

Title	テラヘルツ波帯におけるスーパーオシレーション効果を利用した超集光技術に関する研究
Author(s)	射庭, 彩人
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98624
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

博士学位論文

テラヘルツ波帯における
スーパーオシレーション効果を利用した
超集光技術に関する研究

2024年2月

射庭 彩人

大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報通信工学専攻

目次

第1章	序論	3
1.1	テラヘルツ波とは.....	3
1.2	テラヘルツ波の集光技術に関する現状と課題.....	4
1.3	本論文の構成.....	6
	参考文献	7
第2章	スーパーオシレーション	9
2.1	スーパーオシレーションの歴史.....	9
2.2	スーパーオシレーションの原理.....	10
	参考文献	13
第3章	テラヘルツ波帯に向けたスーパーオシレーションレンズの作製と評価	14
3.1	はじめに	14
3.2	テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計手法.....	15
3.3	Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) について	19
3.4	テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計と製作について	20
3.5	テラヘルツスーパーオシレーションレンズの評価系	22
3.6	スーパーオシレーションレンズの評価結果と考察.....	24
3.7	まとめ	28
	参考文献	28
第4章	1軸方向に集光するテラヘルツスーパーオシレーションレンズの作製と評価 ..	30
4.1	はじめに	30
4.2	テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの設計	31
4.3	テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの集光性能	34

4.4	テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの製作	39
4.5	テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの集光性能評価の結果と考察	40
4.6	まとめ	43
	参考文献	43
第5章	メタマテリアル型のテラヘルツスーパーオシレーションレンズの作製と評価	44
5.1	はじめに	44
5.2	微細な周期構造を利用したスーパーオシレーション効果に関する先行研究	44
5.3	メタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーションレンズのパターン設計	46
5.4	設計したメタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーションレンズの製作と性能の評価	53
5.5	まとめ	58
	参考文献	58
第6章	総括	60
	研究業績	62
	謝辞	63

第1章 序論

1.1 テラヘルツ波とは

周波数が0.1~10 THz（波長3 mm ~ 30 μm）の電磁波はテラヘルツ（THz）波と呼ばれ、電波と光の中間の領域に位置している。図1.1は周波数（波長）と、各波長に対応する物質の状態を示した図である。テラヘルツ波は電波の物質を透過する特性と光波の指向性の双方の特性を併せ持つことで知られており、また分子間の相互作用[1]、プラズマ振動、フォノン、分子の回転遷移等、物質の様々な励起の周波数に対応していることから物質の解析に有用であることが知られている。これらの特徴を活かして分光測定に応用し、医薬品[2]、危険物検知[3]、美術品の解析[4]等 さまざまな分野への応用が進められている。特に近年では通信用途において5Gや6Gといった次世代の通信規格にこれらの周波数帯が使われることが決まっており、この分野に関する技術開発が盛んに行われている[5-9]。この周波数帯はX線同様に透過性が高いものの、X線よりも人体への影響が小さいため、セキュリティ面での活躍も期待されている[10]。他にも医療分野ではがん細胞の検出に関する研究にも取り組まれている[11]。

これら以外の分野として工業分野における製品検査への応用にも期待されている。例えば樹脂製品の検査において、従来は近赤外線（周波数214~400 THz、波長1400~750 nm）が主に利用されており、この波長帯では分子単体の振動に対応した波長の吸収を計測し製品の性質を計測することができた。これがTHz波帯になると分子単体の振動ではなく、分子が複数つながりあったより大きな高分子としての高次構造に起因する吸収スペクトルを観測することができる。この高分子による吸収を計測することで今まで把握できていなかった物性を管理できる可能性を秘めている。実際に検査としてTHz波を利用する際には、事前に計測したい物性に高い寄与を持つ周波数帯を特定しておく必要がある。そのうえで

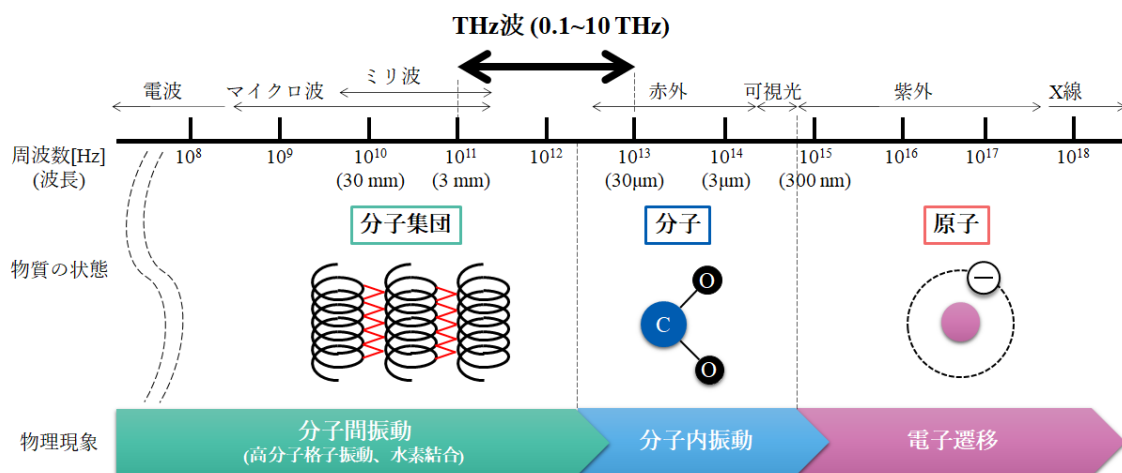


図1.1 電磁波の周波数と対応する現象

特定した周波数の単一でコヒーレントな THz 波発振器を用いて評価を行う[12]。THz 波帯は水分子に高い吸収率を持っており、この特性を活かすことで水分量に起因する製品欠陥や品質の評価に応用できることも期待されている[13]。製造工程では製品に想定以上の水分が含まれてしまうと成型、機能発現に大きく影響することもあり、THz 波を使って非接触で水分量を計測することで品質管理に応用できる可能性がある。他にも塗装膜の内部に異物や欠陥があった場合に、通常の可視光カメラでは見えないが、THz 波で検査することで正確に膜内部の検査ができるという報告もされている[14]。

樹脂製品のなかには金属異物が製品品質に大きく影響するものがあり、そのため工程内の金属検査は重要性が高い。インライン金属検知装置としては X 線、磁気を利用したものが一般的である[15]。しかし、磁気方式は非磁性金属に対して感度が低いというデメリットがあり、フィルム状製品向け検査機の検出下限は磁性金属で $\phi 300 \mu\text{m}$ 、非磁性金属の場合 $\phi 600 \mu\text{m}$ が検出の限界である[16]。一方、THz 波は X 線同様に樹脂に対して高い透過性を持つが、X 線と異なり人体に無害である点、また磁性・非磁性問わず金属に対して高い反射率を持つため新たな検査方式として期待されている[17]。

このように THz 波帯はこれまで一般的に使用されてきた近赤外線や可視光と異なるユニークな特徴を持ち、これを利用することで従来手法とは違った計測ができるためその実用化が大きく期待されている。

1.2 テラヘルツ波の集光技術に関する現状と課題

様々な用途での応用が期待されている THz 波計測だが可視光や近赤外線に比べ波長が長い計測の“空間分解能”を小さくすることが難しいという課題がある。計測の空間分解能を上げる手段の 1 つとしてレンズを使って狭い領域に電磁波を集める方法がある。しかし従来のレンズを使って集光できるスポットの大きさには限界（下限）があり、これはレイリーの回折限界と呼ばれ以下の式がよく知られている。

$$d = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (1)$$

d は回折限界（スポット径の下限）、 λ は波長である。 θ はレンズの径と焦点距離で決まる角度である。 NA はレンズの開口数（Numerical Aperture）であり $NA = n \sin \theta$ で表現される。図 1.2 はレンズを電磁波（平面波）が通過し、1 点に集光する様子を図示したものであり、 θ の定義も図示している。 n は媒質の屈折率であるため、空気中で使用する場合は $n = 1$ となる。理論的には NA が $n = 1$ 、 $\theta = 90^\circ$ のときに最大 $NA = 1$ となり d は波長の約半分程度までが限界といえるが、現実的には $\theta = 90^\circ$ にすることは困難であり、市販されている一般的な光学レンズでは $NA = 0.5 \sim 0.7$ 程度に留まっている。顕微鏡用途として計測したい試料とレンズの間にイメージンオイルで満たすことで $NA > 1$ の条件を作り出し、試料表面からの反射を抑えるとともに NA を改善することでより小さな分解能を実現する方法もあ

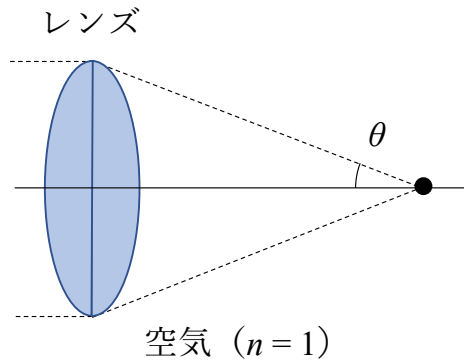
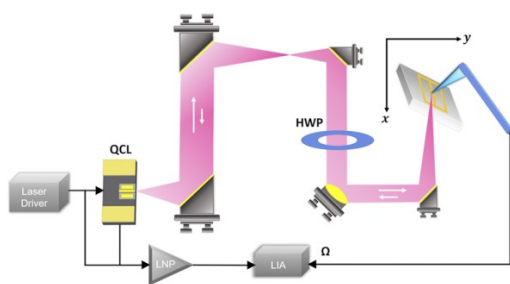


図 1.2 レンズの開口数

る。しかし、これは試料もしくはカバーガラスにイメージジョンオイルが付着しても問題ない場合、かつレンズを試料から近い距離に設置できる場合に限定されるため汎用性が低い。

THz 波帯の回折限界を超える超分解能に関する従来研究としては、例えば負の屈折率を実現したスーパーレンズ[18]や THz- scanning near field optical microscopy (THz-SNOM) [19]、Bull's eye Lens[20]、がある (図 1.3)。Nikollao ら[19]は図 1.3(a)のようにマイクロスコーププローブを利用して超分解能実現にアプローチしている。THz-QCL から 3.45 THz ($\lambda = 87 \mu\text{m}$) の THz 波を計測対象に照射し、計測対象表面から近接場の距離にプローブを近づける。プローブと計測対象表面に偏在しているエバネッセント波が作用することで伝搬波に変換され、THz 波を入射した経路を逆に経路することで受信している。この時の分解能はプローブの先端サイズに依存し、文献では 35 nm の非常に小さな分解能を実現している。また図 1.3(b)のように同心円状の金属パターン (Bull's eye lens) を利用する方法もある。等間隔に円形のパターンがレンズ表面上に施されており、中央部分には波長よりも小さな

(a) THz - scanning near-field optical microscopy



(b) THz - bull's eye lens with 0.33THz

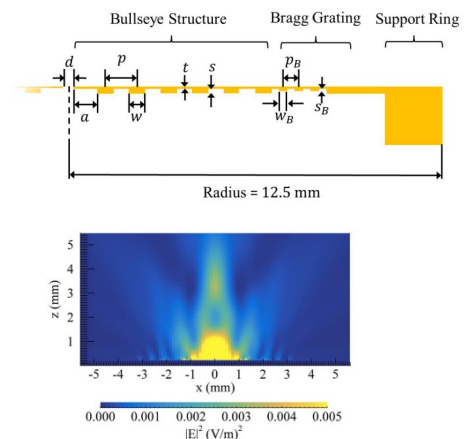


図 1.3 THz 波帯の超集光に関する研究まとめ、(a) プローブを利用して表面からのエバネッセント波を計測[19]、(b)ブルズアイ構造によって表面プラズモンを利用した超集光 [20]

穴が開いている。THz 波をこの構造に入射すると、溝によって表面プラズモンが金属層平面方向に伝搬する。これにより中央部分の穴に電場が集中し、波長よりも直径が小さな穴を通過、THz 波を入射した面の裏側に小さな集光点が生成される。

ここまで説明してきた超分解能に関する先行研究ではエバネッセント波を利用している。エバネッセント波を利用する手法は、回折限界を超えて小さなスポットを生成できるが、その性質上レンズ近傍の近接場にしかスポットを生成できないという制限がある。THz 波を用いた計測技術の普及・実用化を目指したとき、スポットが生成できる距離（焦点距離）がレンズ近傍に制限されてしまうと適用できる分野・範囲も大きく制限されてしまう。また超分解能に関する従来研究は顕微鏡のような静止した環境下での使用を想定したものが多く焦点深度（Depth of focus (DOF)）が極端に短いものが多い。実用化を目指したとき通常の計測環境でも計測対象のブレや多少の位置変動に対してのロバスト性があることが望ましい。

ちなみに THz 波帯の超集光技術を研究するにあたっては、多少のロスがあっても従来の限界より小さな範囲に集光できる方が好ましい。集光のための要素でエネルギーロスが発生したとしても、発振器の出力を上げる、受信機の感度を上げる等対策をとることができるが、計測分解能を向上させるためには集光技術の改善に取り組むしかない。

そこで本研究では目標として、回折限界以下の集光サイズ、Far-field の焦点距離、長い DOF、これら 3 つの条件を満たす THz 波帯の集光技術について、これまで THz 波帯の集光技術では使われてこなかった“スーパーオレーション”と呼ばれる現象を使ったレンズを様々な条件、形状で設計開発・評価することで、THz 波帯の計測技術の普及加速を目指す。

1.3 本論文の構成

本論文は全 6 章で構成される。各章の概要は以下のとおりである。

第 2 章では本研究で注目したスーパーオシレーション (Super-oscillation) [21] と呼ばれる物理現象の歴史と原理について記述する。帯域制限された関数において局所的にその最高のフーリエ周波数成分よりも高い周波数成分をもつ特性を持った関数をスーパーオシレーション関数と呼ぶ。物理的に帯域制限された系においても、例えば光や電波のような波に対して同様に局所的にフーリエ周波数成分を大きく外れて高い周波数成分を生じさせることが出来る。本研究において重要なこの物理現象について述べる。第 3 章以降では、スーパーオシレーションを応用した新しい TH 波帯のレンズについて、目的に応じた 3 種類の異なるタイプのレンズを製作・評価を実施、考察する。

第 3 章では同心円型の THz 波向けスーパーオシレーションレンズ (Super-oscillatory lens、SOL) について述べる。従来研究では主に紫外 (UV) ・可視光の顕微鏡用途として SOL の研究が報告されており、THz 波帯への応用はこれまであまりされてこなかった[22,23]。私は SOL を THz 波向けに設計製作し、実験にてその性能を実証した[24-26]。このタイプの特

徴は、任意の焦点距離において1点の回折限界以下の極小のスポットを実現するとともに、長い焦点深度も維持することができる点にある。本研究ではTHz波帯の範囲である0.1 THz ($\lambda=3\text{ mm}$) 向けに同心円型のメタルスリットを利用してSOLを設計した。レンズ径を100 mm、焦点距離を75 mmとして設計し、フォトリソグラフィによってガラス基板の上に金属薄膜のパターンを蒸着することで製作している。また、その性能を評価するため、分解能評価用のサンプルを製作し、計測分解能の評価を実施した。結果、1.5 mm (0.5λ) の幅のパターンに対するクリアなイメージング結果を実験的に確認できた[24]。

第4章では1軸方向にのみ集光するTHz - Cylindrical Super-oscillatory lens (THz-CSOL) の開発について述べる。このレンズはラインアンドスペースの金属パターンによって一定の方向にのみスーパーオシレーション効果を発現する。計算によって回折限界以下の集光ができること、合わせて焦点距離が10 mm以上、DOFが5 mm以上であり目標の全ての条件を満たしていることを確認した。また焦点距離50 mm、100 mmの焦点距離が異なる2種類のTHz-CSOLを設計製作、実験にて回折限界以下の集光能力があることを確認した[25]。

第5章ではメタマテリアル型のTHz-SOLの開発について述べる。このレンズの特徴は波長以下の構造をレンズ面内に周期的に配置したメタマテリアルベースのTHz-SOLであり、レンズ面内に複数の極小スポットを生成できる。この特徴を利用することで面内を多点同時計測できると考えた。本研究では円形のスリット5個を十字に並べたものを単位パターンとし、これを同一レンズ面内に並べることで単位パターン毎に焦点を生成させることができる。このときの焦点のサイズは回折限界以下のサイズを実現しており、これにより多点を同時に高分解能で計測できるようになる。このレンズについての設計製作、評価結果について述べる[26]。

最後に第6章にて本論文の総括を行い、用途に合わせた3種類のTHz-SOLを開発して得られた主要な結果と将来の展望について述べる。

参考文献

- [1] N. Nagai *et al.*, Chem. Phys. Lett. **413**, 4, 495-500 (2005).
- [2] D. M. Charron *et al.*, Analytical Chemistry, **85**, 4, 1980-1984 (2013).
- [3] J. Wang *et al.*, Journal of The Electrochemical Society, IOP Publishing, Technical report, **168**, 117517 (2021).
- [4] K. Fukunaga *et al.*, Applied Physics A, **122**, 2, 106 (2016).
- [5] R. Bin Sulaiman *et al.*, IUP Journal of Telecommunications, **13**, 2, 7 (2021).
- [6] A. Al-Hourani *et al.*, Academic Press Library in Signal Processing, **7**, 317-363 (2018).
- [7] M. Fujita, 8th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science, Hanoi, Vietnam, 348-351 (2021).

- [8] J. Wei *et al.*, arXiv preprint, **2307**, 10321 (2023).
- [9] C. -X. Wang *et al.*, in IEEE Vehicular Technology Magazine, **16**, 4, 27-37 (2021).
- [10] Y. Takida *et al.*, Opt. Express **29**, 2, 2529-2537 (2021).
- [11] Y. Peng *et al.*, BME Frontiers, **2020**, 1-11, (2020).
- [12] 北村 文乃, 他, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), **143**, 5, 180-185 (2023).
- [13] H. Ge *et al.*, Int. J. Mol. Sci. **24**, 13, 10936 (2023).
- [14] H. Feddal *et al.*, Microwave and Optical Technology Letters, **60**, 10, 2429-2437 (2018).
- [15] 植山 英弘, 包装技術, **46**, 10, 808-812 (2008).
- [16] アンリツ株式会社, <https://www.anritsu.com/ja-jp/infvis/products/metal-detection/high-sensitivity>, (2023).
- [17] N. Palka *et al.*, Terahertz Science and Technology, **6**, 1, 99-107 (2016).
- [18] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett., **85**, 18, 3966-3969 (2000).
- [19] N. Sulollari *et al.*, APL Photonics, **6**, 6, 066104(2021).
- [20] D. A. Naylor *et al.*, 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, Hong Kong, China, 1-2 (2015).
- [21] G. Chen *et al.*, Light Sci Appl., **8**, 56 (2019).
- [22] G. Yuan *et al.*, Light Sci. Appl., **6**, e17036 (2017).
- [23] D. Tang *et al.*, Opt. Express, **27**, **9**, 12308-12316 (2019).
- [24] A. Iba *et al.*, Opt. Lett., **46**, 19, 4912-4915 (2021).
- [25] A. Iba *et al.*, Sensors, **21**, 20, 6732 (2021).
- [26] A. Iba *et al.*, Appl. Sci., **12**, 24, 12770 (2022).

第2章 スーパーオシレーション

2.1 スーパーオシレーションの歴史

これまで THz 波帯でビームを集光する手段としては高密度ポリエチレン (HDPE) やテフロンを加工したレンズを用いられることが一般的であった。これらのレンズを使うとビームはレンズの形状によって決まる焦点距離 1 点に集光され、このスポットの大きさの限界が第 1 章で記述した回折限界である。この回折限界に縛られない手法として“スーパーオシレーション”と呼ばれる現象に注目した。

帯域制限された関数が、最も高いフーリエ成分よりも局所的に高く振動することがあり、この現象自体は情報理論や光学など様々な分野で以前から知られていた[1-10]。この現象が“スーパーオシレーション”と呼ばれる現象である。最初は量子力学の分野において弱測定時に観測対象が発するスペクトルが予想から外れた周波数が計測されたことをきっかけにして[11]、次第にレーダーや光学の分野でも研究が取り組まれるようになり、現在関連分野への応用に広がりつつある。

第二次世界大戦中にはマイクロ波アンテナに関する研究でスーパーオシレーションが取り扱われている。任意の狭い領域に複数の放射素子を配置し、その放射パターンがレイリー回折限界よりも狭い角度幅のプロファイルを持つビームを生成するレーダーアンテナを設計できることが実証されており、このアンテナの「超指向性」や「超利得」といった特性が実現できる原理が、スーパーオシレーションによるものである。しかし、この超指向性にはデメリットもあり、現実的に活用できるビーム強度を実現するには個々の素子を非常に強く発振しなければならなかった。そのうえ遠方界に到達する細いビームよりも近傍界が指数関数的に強くなってしまいうという欠点があり、その使い勝手の悪さから長い間実用化されてこなかった[12]。

また次に Toraldo が光学分野でも応用できることに気づき、アッペの分解能限界を超える超解像顕微鏡実現のため、焦点距離が非常に小さいレンズを提案している[13]。当時の技術ではこのレンズを製作するための微細な加工が難しかったため製作するには至らなかったが、現在では加工技術も発達し、超解像顕微鏡として実用化されつつある[14]。その後、2006 年には Berry と Popescu は光学分野の超解像への応用を提案している[15]。彼らは波長より小さな構造を持つ回折格子にコヒーレント光を入射し、通過した光の強度分布がエバネッセント波を使用することなく波長より小さな強度分布を保ったまま伝播できることを理論的に証明した。同時期に、コヒーレント光を照射したナノホールのアレイ上を波長より小さなアパーチャーを走査することで、波長以下の大きさのホットスポットが生成されていることが実験的に確認されている[16,17]。このようにスーパーオシレーションは量子力学の分野に端を発し、可視光におけるサブ波長イメージングに応用されるようになっていったが、THz 波帯でのレンズ応用についてはまだ本格的な取り組みがされていなかった。

2.2 スーパーオシレーションの原理

2.1でも触れた通り、帯域制限された関数のなかで局所的にその関数に含まれるフーリエ成分以上に高い周波数成分を持つ関数のことをスーパーオシレーション関数と呼ぶ。

Berryらはスーパーオシレーションの光学的超解像への応用に対し、次のような形でスーパーオシレーション関数を表現している[15]。

$$f(x) = (\cos x + ia \sin x)^N \quad (a > 1, N \gg 1) \quad (2)$$

$f(x)$ は1次元の周期関数であり、 x は実数の変数、 a はスーパーオシレーション関数 $f(x)$ の周期を表現する係数、 N は次数である。 $a = 1$ の場合、 $f(x) = \exp(iNx)$ となり平面波を表す式となる。一方 $a > 1$ の場合、 $f(x)$ は周期 π の周期性を持ち、 $x = 0$ 付近の振幅の周期が高く以下の数式で表すことができる。

$$f(x) \approx \exp(N \log(1 + iax)) \approx \exp(iaNx) \quad (3)$$

この関数は最大波数 N を持つ帯域制限関数であり、そのフーリエ級数からわかるように

$$f(x) = \sum_{n=0}^N c_n \exp(iNk_n x) \quad (4)$$

と表現できる。フーリエ級数の展開係数を c_n とした時、式(2)の二項展開から得られ、式(5)のように表される。

$$c_n = \frac{N!}{2^N} (-1)^n \frac{(a^2-1)^{N/2} [(a-1)/(a+1)]^{Nk_n/2}}{[N(1+k_n)/2]! [N(1-k_n)/2]!} \quad (5)$$

また $k_n = 1 - 2n/N$ であるから $|k_n| \leq 1$ であり、これは式(3)がスーパーオシレーションの挙動を説明しているとともに、スーパーオシレーションの度合いを a によって表現している。

またBerryらはより詳細にスーパーオシレーションを理解するため、 $f(x)$ を式(6)、 $k(x)$ を式(7)としても表現している。

$$f(x) = \left(\frac{a}{k(x)} \right)^{N/2} \exp \left\{ iN \int_0^x dx' k(x') \right\} \quad (6)$$

$$k(x) \equiv \frac{1}{N} \text{Im} \partial_x \log f(x) = \frac{a}{\cos^2 x + a^2 \sin^2 x} \quad (7)$$

波数 $k(x)$ はスーパーオシレーション領域の $k(0) = a$ から最も遅い波数 $k(\pi) = 1/a$ まで変化する。このとき $|k| > 1$ であるスーパーオシレーション領域では式(8)として表現できる。

$$|x| < x_s = \text{arccot} \sqrt{a} \quad (8)$$

またこの領域における振動の数は式(9)で表現できる。

$$n_{\text{osc}} = \frac{N}{2\pi} \int_{-\text{arccot} \sqrt{a}}^{\text{arccot} \sqrt{a}} dx k(x) = \frac{N}{2\pi} \arctan \sqrt{a} \quad (9)$$

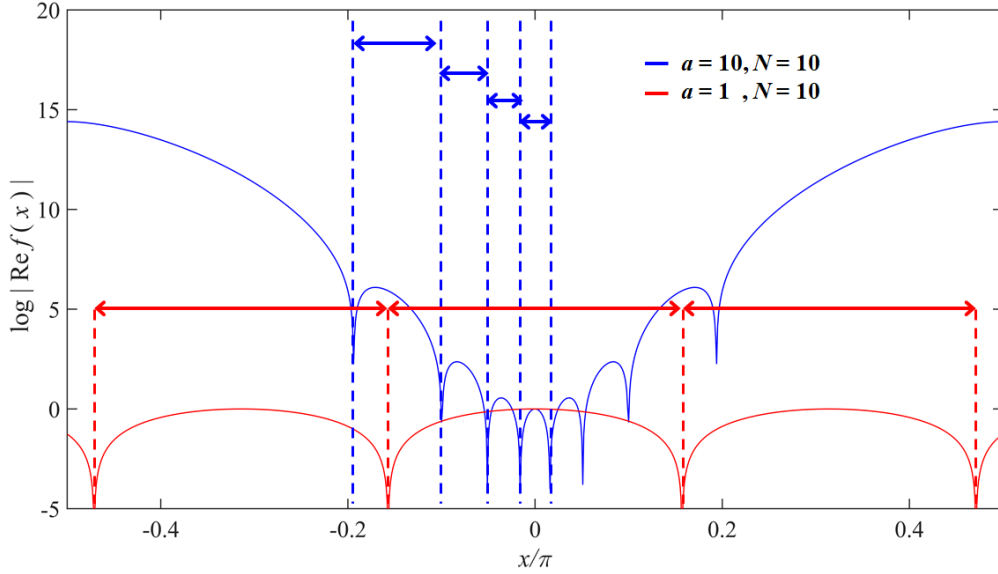


図 2.1 スーパーオシレーション関数が $a > 4$ のとき $x=0$ 付近で周波数成分が高くなる様子

式(6)は $|f|$ がスーパーオシレーション領域 ($|k| > 1$) では通常の領域 ($|k| < 1$) と比較して指数関数的に小さくなることを示している。したがって N は漸近的なパラメータであり、スーパーオシレーション領域の振動数と、それに対応する $|f|$ の指数関数的な小ささを表している。

図 2.1 は式(2)に具体的な数値を用いて計算したグラフである。ここで青のラインは $a = 10$ 、 $N = 10$ の条件で、赤のラインは $a = 1$ 、 $N = 10$ の条件で計算した結果である。 $a = 1$ の条件 (赤線) の場合は同じ幅のピーク (振幅の間隔が同じ) が並んでいることが分かる。しかし、 $a > 4$ の条件 (青線) の場合、 $-0.5 < x/\pi < 0.5$ の範囲に確認できる複数のピークが $x/\pi = 0$ 付近に近づくにつれ幅が細く (振幅の間隔が短く) なっていることが分かる。

このようなスーパーオシレーション関数を電磁波で考えると、関数 $f(x)$ は電磁波の伝搬方向 $z = 0$ における平面でスリット間隔 d を持つ回折格子によって生成されると考えることができ、 $z > 0$ に伝播していく電場は伝播する平面波のみから構成される。

$$\frac{aN}{d} > k > \frac{N}{d} \quad (10)$$

ここで k は波数であり、式(10)の条件を満たす場合エバネッセント波を含まない。このことがエバネッセント波を利用しない Far-field での回折限界以下への集光につながっていく。計算上回折格子の間隔 d は無限に小さくできるが、現実的には製作する上での加工精度により制限され、有限の値を持つことになる。

ここでさらにシンプルな関数でスーパーオシレーションの具体例を示す。

$$f(x) = A + B \cos(2\pi \times x) + C \cos(2\pi \times 2x) + D \cos(2\pi \times 3x) + E \cos(2\pi \times 4x) + F \cos(2\pi \times 5x) \quad (11)$$

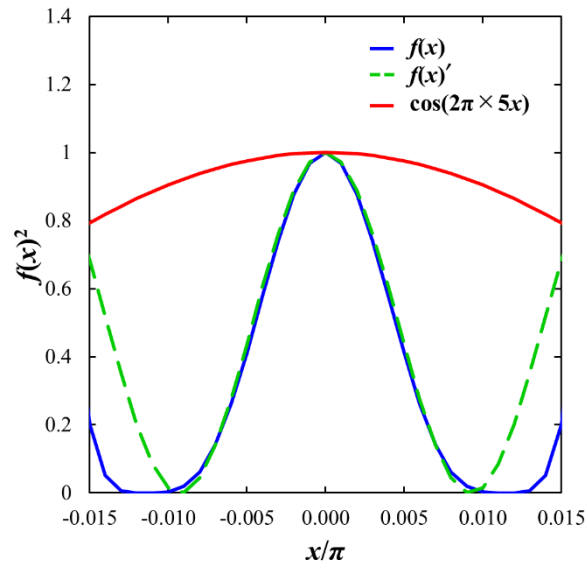


図 2.2 重ね合わせに使用した関数の周波数よりも高い周波数成分が発現している様子
 青： $f(x)$ 、緑： $f(x)'$ 、赤： $f(x)$ を構成する波の中で最も高い周波数成分

式(11)のように 5 種類の周波数 ($0, x, \dots, 5x$) の波を足し合わせた数式を考える。このとき定数 $A = 1$ 、 $B = 13295000$ 、 $C = -30802818$ 、 $D = -26581909$ 、 $E = -10836909$ 、 $F = 1762818$ とし、この数式の計算結果を図 2.2 に示す。青の実線は $f(x)$ の計算結果を示し、赤の実線は $f(x)$ に含まれる最も高い周波数成分である $\cos(2\pi \times 5x)$ のグラフを示している。 $f(x)$ に含まれる最も高い周波数成分である赤の実線のピークよりも青の実線のピークのほうが細くなっていることから、 $f(x)$ は重ね合わせに使用した波の周波数成分よりも高い周波数成分を持つことが分かる。緑の破線は $f(x)$ において $x=0$ 付近のピークの幅・高さと同じになるよう \cos 関数で最小二乗近似した関数 $f(x)'$ であり、計算の結果 $f(x)' = \cos(2\pi \times 27x)$ となる。この結果から $f(x)'$ の周波数成分は $f(x)$ に含まれる最も高い周波数成分の 5.4 倍であり、 $f(x)$ が重ね合わせに使用した波の周波数成分よりも 5.4 倍高い周波数成分を持つことを意味している。このように低い周波数成分の波を任意の係数をかけたうえで複数足し合わせることで、それらに含まれている周波数より高い周波数成分を生じさせることができるのがスーパーオシレーション現象である。

このようなスーパーオシレーションと呼ばれる現象を利用したレンズが SOL である。ただし図 2.2 のグラフではセンター ($x=0$) 付近に高い周波数成分のピーク生成に成功しているが、同時にセンターのサイドにも大きなピークが発生しており、このままではレンズとして利用する上で計測を阻害することになる。そこで次の章からはサイドのピーク強度を抑えながらもセンターのピークの高い周波数成分を実現するためのレンズ設計方法について述べていく。本研究では用途に合わせて形状の異なる 3 種類の THz 波帯向け SOL を開発し、その集光性能を実証した。これらについて次章から詳細に述べていく。

参考文献

- [1] Y. Aharonov *et al.*, Tel-Aviv, University Preprint, TAUP 1847–90, (2006).
- [2] Y. Aharonov *et al.*, Phys. Rev. A, **41**, 11-20 (1990).
- [3] Y. Aharonov *et al.*, Phys. Rev. Lett. **64**, 2965-2968 (1990).
- [4] Y. Aharonov *et al.*, Phys. Rev. A, **48**, 4084-4090 (1993).
- [5] M. Berry, J. Phys. A: Math. Gen., **27**, 391-398 (1994).
- [6] M. Berry, Celebration of The 60th Birthday of Yakir Aharonov ed J S Anandan and J L Safko, 55-65 (1994).
- [7] S. Popescu, PhD Thesis Physics Department, Tel-Aviv University (1991).
- [8] A. Bucklew *et al.*, J. Opt. Soc. Am. A, **2**, 1233-1236 (1985).
- [9] A. Kempf *et al.*, J. Phys. A: Math. Gen. **37**, 12067-12076 (2004).
- [10] M. S. Calder *et al.*, J. Math. Phys., **46**, 012101 (2005).
- [11] M. R. Dennis *et al.*, New. J. Phys., **14**, 073013 (2012).
- [12] M. Berry *et al.*, J. Opt. **21**, 053002 (2019).
- [13] G.T. di Francia, Nuovo Cimento, Suppl. **9**, 426-438 (1952).
- [14] E. T. F. Rogers *et al.*, Nat. Mater., **11**, 432-435 (2012).
- [15] M. Berry *et al.*, J. Phys. A: Math. Gen., **39**, 6965-6977 (2006).
- [16] F. M, Huang *et al.*, Nano Lett., **8**, 8, 2469-2472 (2008).
- [17] Y. Eliezer *et al.*, ACS Photonics, **3**, 1053-1059 (2016).

第3章 テラヘルツ波帯に向けたスーパーオシレーションレンズの作製と評価

3.1 はじめに

第2章で記述したスーパーオシレーションという数学的性質は電波や音波のような波の性質を持つ物理現象でも利用することが出来る。面内が部分的に電磁波を透過するマスクを使用し、空間上に複数の強度の空間周波数分布を生じさせることで、使用したマスクの構造以下の小さなピークを生成する。このマスクには金属膜上に開口パターンを設けたものや、Si 基板表面に凹凸を設け制御しているものが先行研究で報告されている。このようなスーパーオシレーション現象を利用したレンズを「スーパーオシレーションレンズ (SOL)」と呼ぶ。

Zheludev ら[1,2]は顕微鏡用途で UV、可視光 (波長 640 nm) の電磁波を使って図 3.1(a) に示したスーパーオシレーション現象を利用したレンズを作製することで極小のスポットの生成を実現している。図 3.1(b)は(a)のレンズを通過後の強度分布を示しており、中央の強度が高くなっていることが分かる。また(c)は(b)の中心付近を拡大した画像であり、 $\phi 185$ nm のスポットが生成できていることを示している。またこのレンズを使用し、図 3.1(d)、(f)で示した長方形の開口パターンをイメージングした結果から回折限界以下の分解能を達成していることを図 3.1(e)、(g)で報告している。図 3.1(h)は図 3.1(f)の 2 本のスリットを従来のレンズ (PET やテフロン製の球面レンズ) でイメージングした結果であり、図 3.1(g)で

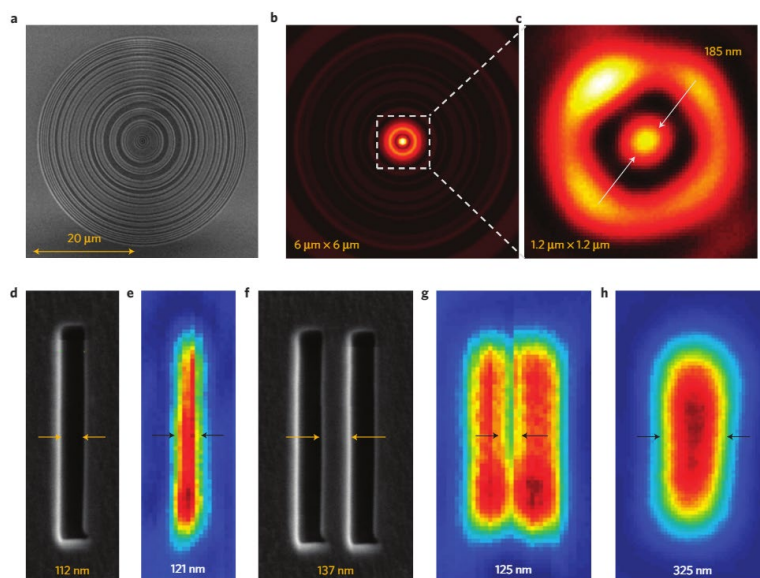


図 3.1 可視光領域で製作された SOL[1]、(a)SOL 写真、(b)、(c)SOL で集光したスポットの計測結果、(d)、(f)スリットの SEM 画像、(e)、(g)SOL でスリットを計測した結果、(h)従来レンズで計測した結果

示している SOL を使った評価結果と異なり、2本のスリットの区別ができていないことを示している。SOL による極小スポットは従来の屈折を利用した球面のレンズと集光の原理が異なるため、回折限界の制限を受けない。またエバネッセント波に依存した手法ではなく、任意の焦点距離において複数の空間周波数の電磁波の干渉を利用しているため近接場に限定せず Far-field な領域で極小のスポットを生成することが出来るという特徴を持つ。

本研究では THz 波帯の波長が可視光や近赤外線に比べて長く、回折限界によって分解能を高くすることができなかつた課題に対し、これまであまり取り組まれてこなかつたサブ THz 波帯におけるテラヘルツスーパーオシレーションレンズ (THz-SOL) の実現に取り組んだ。同心円型の金属パターンを利用し、スーパーオシレーションによる回折限界以下の集光を実現している。今回は 0.1 THz にて集光するようレンズの設計製作を行い、実験にて評価を実施している。

3.2 テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計手法

SOL は透過・非透過の領域の配置を最適化したパターンで構成されている。このパターンはガラス基板上に蒸着した金属薄膜上に開口 (スリット) を設けることで透過部を形成している。一般的なラインアンドスペースの回折格子ではスリットと直行した方向に電磁波が透過するのはよく知られている[3]。SOL も同様にレンズ半径方向に並んだパターンに対して直交した方向の偏光成分が透過する。この透過した偏光成分がスーパーオシレーション効果を発現させ、透過する偏光と平行な方向に集光の効果が表れる。そのため任意の1点に集光するためには、円形のパターンに対して円偏光のビームを入射する必要がある。図 3.2 は THz-SOL と、THz-SOL 通過後に観測面 (Observation plane) で1点に集光する様子を表した模式図である。x軸, y軸の方向はそれぞれレンズの半径方向であり、z軸方向が焦点距離の方向である。左の $z = 0$ mm の Aperture plane (xy 平面) に設置されているのが

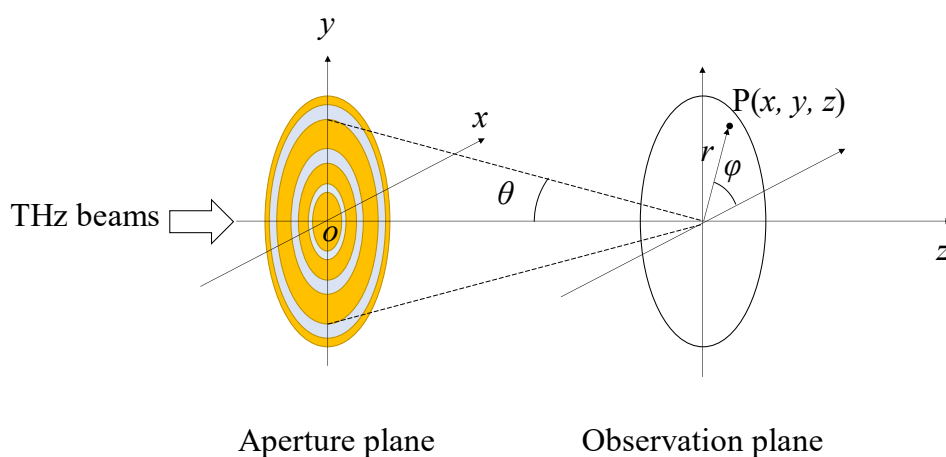


図 3.2 THz-SOL による集光の模式図

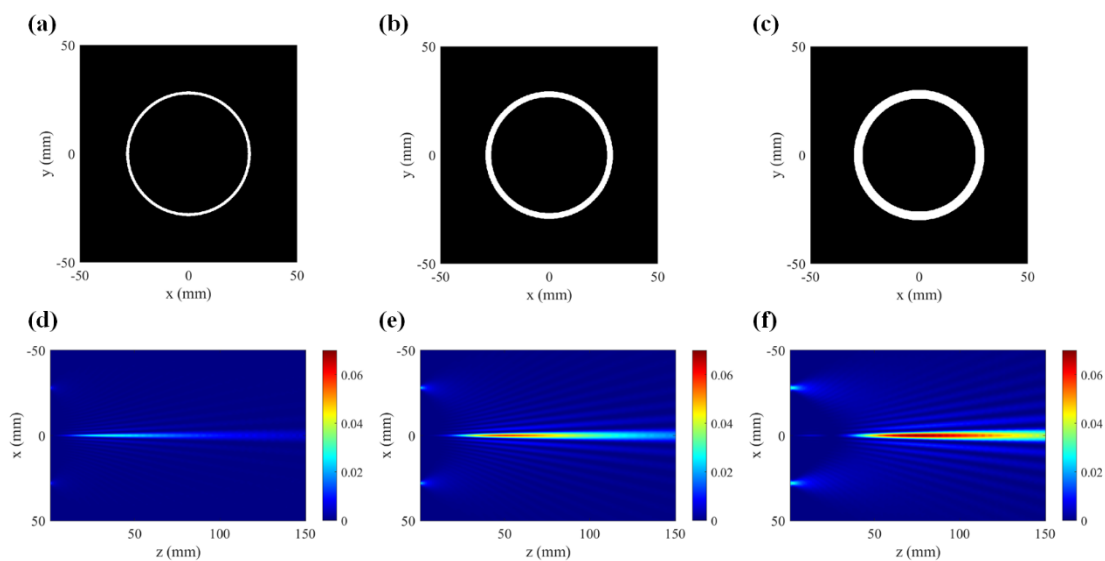


図 3.3 円形スリットの幅による干渉分布変化、(a)-(c)スリットの図、(d)-(f)スリット通過後の強度分布、(a)、(d)スリット幅：0.58 mm、(b)、(e)スリット幅：1.17 mm、(c)、(f)スリット幅：1.76 mm

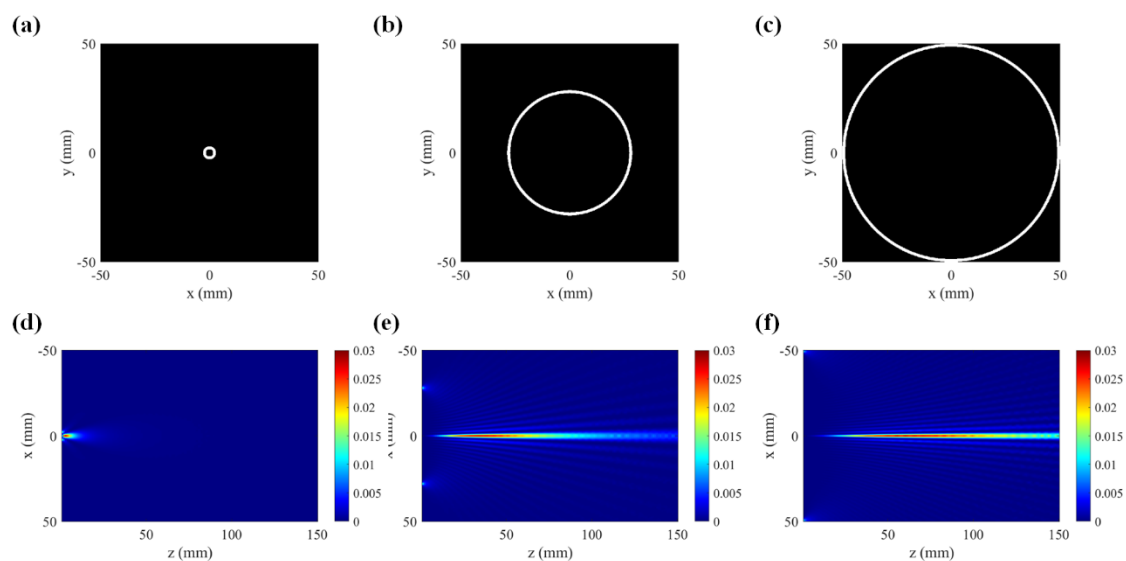


図 3.4 円形スリットの半径による干渉分布変化、(a)-(c)スリットの図、(d)-(f)スリット通過後の強度分布、(a)半径：1 mm、(b)半径：12.3 mm、(c)半径：21.7 mm

THz-SOL の模式図であり、黄色部分が金属、灰色部分がガラス基板部分を示している。図の左側から THz 波が入射され、この複数の同心円型の金属スリットを通過した THz 波は z 方向に進みながら干渉し強め合う。金属スリットの幅、配置、をうまく設計することで、任意の焦点距離で強く干渉させ、回折限界以下のスポットを生成させることができる。この集光する点（焦点）が図 3.2 の右側の Observation plane の原点である。このとき θ は

Aperture plane における THz-SOL のスリット部の任意の点と Observation plane の原点（集光位置）、 z 軸でなす角度を示している。Observation plane の任意の点 $P(x, y, z)$ の強度は THz-SOL のスリット部における各点から到達する電場の総和として表現することができる。

次にマスクに同心円型のスリットを 1 本設けたときの電磁波の挙動について記述する。図 3.3 は 1 本の同心円状のスリットを THz 波が通過した後の強度分布を示している。図 3.3(a, b, c) はスリットの幅が異なる同心円型の 3 種のマスクを示しており（半径 12.3 mm、(a) スリット幅：0.58 mm、(b) スリット幅：1.17 mm、(c) スリット幅：1.76 mm）、白い部分が電磁波の透過部、黒い部分が電磁波の日透過部分である。それぞれのスリットを THz 波が通過した後の強度分布を図 3.3(d, e, f) に示す。図 3.3(d, e, f) から、スリットの幅が狭いほど回折が強くなるため、THz 波が集光する位置がスリットの位置 ($z = 0$) に近くなり、かつ集光したスポットの強度が弱くなっていることも分かる。

またスリットの半径もスリット通過後の強度分布に影響する。図 3.4 はスリットの幅は 1.17 mm、半径だけが異なる 3 種のスリットを通過後の電磁波の強度分布を比較している。半径が小さいほど、焦点距離が短くなっていることが分かる。このようにスリットの幅、半径がスリット通過後の電磁波の集光に大きく影響することが分かる。さらにスリットを複数設け、それぞれの幅、半径を最適に設計することで回折限界以下のスポットが生成可能なパターンを求めることができる。

ここから THz-SOL のレンズ設計の流れについて述べていく。図 3.5 は設計フローを示したものである。図 3.5 左上のように最初にレンズの径を決め、その範囲内を同心円状の単位領域に区切っていく。この単位領域は波長より小さな幅を持つ同心円状の領域である。区切った各単位領域の透過・非透過をランダムに定め、仮のレンズパターンを作製する。次に図 3.5 下中央のように仮のレンズパターンを作製した後、このパターンを使った場合の任意の焦点距離における強度分布を計算する。 x, y, z 軸方向の強度分布 E_x, E_y, E_z は以下の式の通り極座標で表現した角スペクトル法を用いて計算できる[4-8]。

$$\begin{aligned} E_x(r, z) &= \int_0^\infty A_0(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_0(2\pi lr) 2\pi l dl \\ E_y(r, z) &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

$$E_z(r, \varphi, z) = -j \cos \varphi \int_0^\infty \frac{1}{q(l)} A_0(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_1(2\pi lr) 2\pi l dl$$

$$\text{with } A_0(l) = \int_0^\infty t(r) g(r) J_0(2\pi lr) 2\pi r dr$$

r はレンズ半径方向の位置、 $q(l)$ はレンズパターンによって生じるレンズ径方向の空間周波数成分、 $A_0(l)$ はレンズ内の電場の角スペクトルである。 J_m は m 次のベッセル関数、 $t(r)$ はレンズの透過率関数、 $g(r) = \exp(-r^2/w_0^2)$ 、 w_0 はガウシアンビームを用いた場合のビームウェストでの半径である。さらにこの数式を用いて SOL へ円偏光のビームを入射したときの任意の焦点距離 z での電場強度は以下のように表現できる。

$$I(r, \varphi, z) = 2 (|E_x(r, z)|^2 + |E_z(r, \varphi, z)|^2) \quad (13)$$

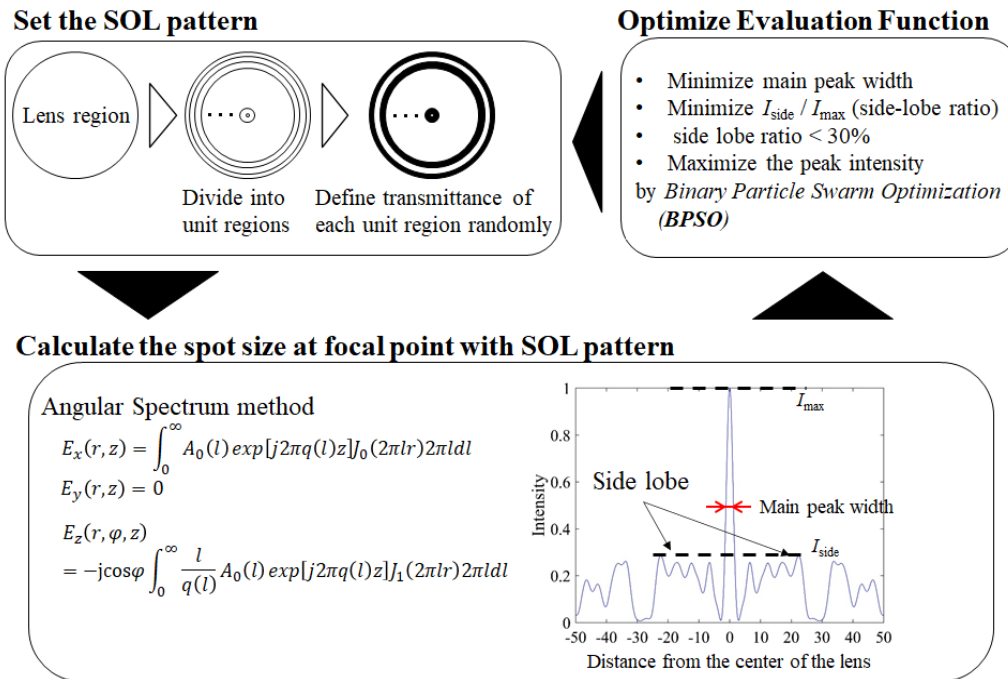


図 3.5 THz-SOL パターンの設計フロー

図 3.5 右下のグラフは上記の計算で得た焦点距離における強度分布を示しており、図のように焦点平面の中心に発生するピークの幅（本研究では半値全幅（FWHM）で評価した）、ピークの強度、サイドローブの大きさを計算する。SOL は従来と異なる集光原理により極小のピークを生成できるが、メインピークと同時にその周囲にも別のピーク（サイドローブ）が発生してしまうことが避けられない。もしサイドローブがメインピークと近く、また強度もメインと比較して大きなピークになった場合、計測分解能を低下させてしまう。そのため計測分解能向上のためにメインピークを細く、強くするとともに、サイドローブの大きさを小さく抑えたデザインを設計する必要があった。

以下 3 つの条件を評価関数とし、仮のレンズパターンの最適化を実施する。

- メインピークの幅の最小化
- メインピーク強度の最大化
- サイドローブ比（メインピーク強度に対するサイドローブ強度の割合）の最小化

本研究では最適化に対し後述する Binary Particle Swarm Optimization（BPSO）を利用している。そして最適化の結果、最終的に所望の SOL パターンを得ることが出来る。この設計フローを図にしたものが図 3.5 である。本研究では上記 3 条件に加え、図 3.5 右上のようにサイドローブ比が 30% 以下であることを条件に加え、最適化計算を行った。

ここでこのフローと第 2 章の式(2)、(3)との関係について述べる。式(2)、(3)は \cos 関数の周波数を変えたものを足し合わせていくことで、足し合わせに使用した \cos 関数が持つフーリエ成分以上に高い周波数成分を生じさせていた。これに対しレンズの設計フローの中でレンズ面内を単位領域で区切っているが、この単位領域をどんどん細かくしていくこと

で、デザインできるバリエーションが増えデザインが持つ周波数成分が高くなっていく。これが式(3)中の n が大きくなり高いフーリエ成分が増えることが同義となっている。一見つながりがなさそうに見えるが、このようにレンズの設計フローは確かにスーパーオシレーションの原理に基づいたものになっている。

3.3 Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) について

3.2 で触れた最適化の手法について述べる。まず Particle Swarm Optimization (PSO) について述べると、PSO は魚や昆虫のような群れで行動する生物の動きを模倣したアルゴリズムになっており、広い解析空間から効率的に局初解に到達できることが特徴である。図 3.6 はこのアルゴリズムのイメージ図である。解析空間の中で比較的近い場所に複数の粒子 x_t (群れ) があり、図 3.6 中では蜂の絵で表現している。この群れが複数解析空間の中に存在する。各群れの中で最も評価関数の条件を満たすものをパーソナルベスト p_{best} と呼び、さらに全粒子の中で最も評価関数の条件を満たすものをグローバルベスト g_{best} と呼ぶ。次に解析を行う粒子 x_{t+1} は 1 個前の粒子 x_{t-1} と現在の粒子 x_t の差、それから p_{best} と x_{t-1} の差、 g_{best} と x_{t-1} の差の重ね合わせで決まる。これを数式で表現したのが以下の式である。

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1}$$

$$\text{with } v_{t+1} = c_0(x_t - x_{t-1}) + c_1 \text{rand}(p_{best} - x_t) + c_2 \text{rand}(g_{best} - x_t) \quad (14)$$

v は位置を更新するための速度ベクトル、 c_0 、 c_1 、 c_2 は重み計数であり、PSO では c_1 と c_2 は同じ値で 1.5 が推奨値、 c_0 は繰り返し試行毎に小さくなるようにするのが好ましいとされており 0.9 から 0.4 まで変化することが推奨されている[9]。 c_1 と c_2 には乱数をかけることでランダム性を持たせ、より効率的に解に収束するよう工夫されている。

ただし、なかには PSO では表現できないような問題も世の中には存在する。例えばスイッチの ON/OFF のような 2 値でしか表現できないような問題である。この場合には PSO を

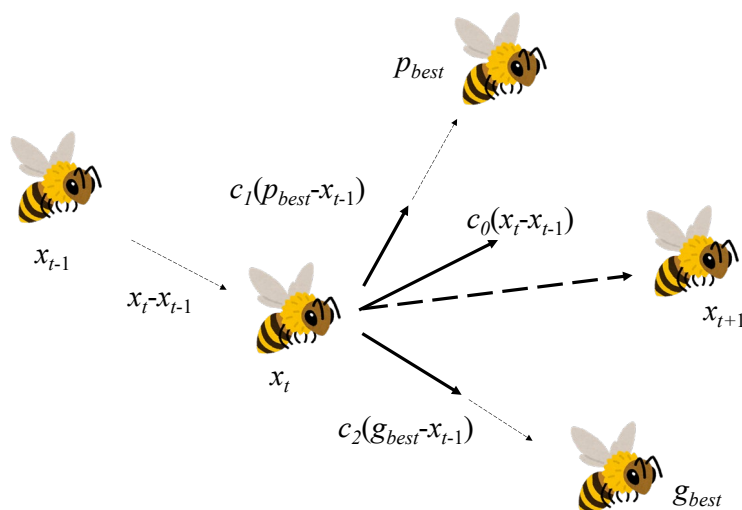


図 3.6 BPSO イメージ図

2 値に拡張した、Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) を用いることで解決する。この場合、粒子の更新のための速度ベクトル v が 0 と 1 の 2 値でしか表現できないので、以下のように表現する。

$$S(v_{mn,t}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{mn,t})}$$

$$\text{if } (rand < S(v_{mn,t})), \text{ then } x_{mn,t} = 1 \text{ else } x_{mn,t} = 0 \quad (15)$$

$S(v_{mn,t})$ はシグモイド関数の形になっており、閾値 $rand$ と比較したときの大小で 0 か 1 のどちらの値になるか決まる。先行研究では閾値は 0.6 を推奨している[4]。これにより 2 値でしか表現できない問題も対応できるようになった。SOL のパターンも透過率が 0 か 1 の 2 値で表現できるため本研究ではこの BPSO を用いてパターンの最適化を実施した。

3.4 テラヘルツスーパーオシレーションレンズの設計と製作について

本研究では 0.1 THz 向けにレンズ径 100 mm、焦点距離 75 mm、単位スリットを 0.5 mm、入射波は円偏光の平面波として THz-SOL を設計した。図 3.7(a) はレンズ断面の模式図を示している。こちら同心円状パターンの中央の断面であり、ガラス基板の上に幅と間隔が最

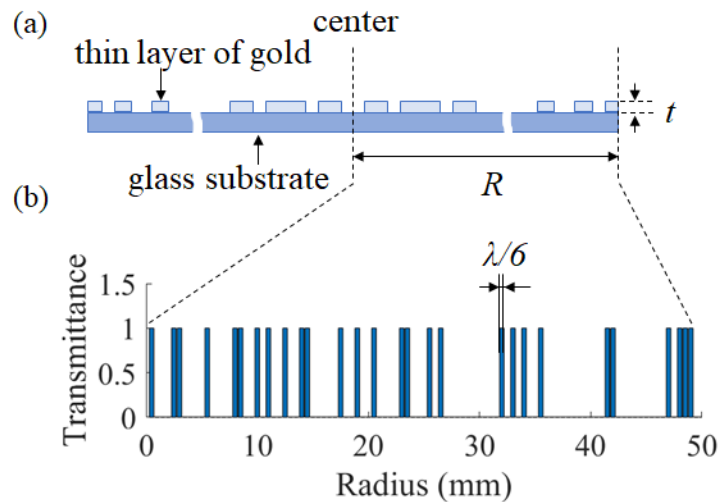


図 3.7 (a) THz-SOL 断面模式図、(b) THz-SOL 半径方向への透過率

表 3.1 レンズの設計パラメータ

Diameter (mm)	Focal length (mm)	Transmittance function (decimal number)
100	75	8C219 49824 86280 15200 3005c

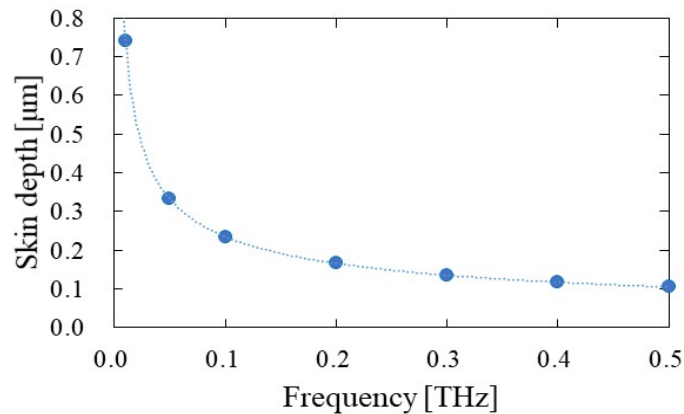


図 3.8 電磁波の周波数と金の表皮深さの関係

適化された金属（金）の薄膜が設けられた形状をしていることを示している。薄膜の厚みが t 、レンズ半径が R 、金属薄膜の最小の幅は $\lambda/6$ である。またこのレンズは同心円形状をしているため左右対称の形状になっており、図 3.7(a)は直径上の断面を示しており、

図 3.7(b)は本研究で設計した THz-SOL のレンズ外周部から中心に向けた透過率の分布を示している。THz 波はガラス基板部を透過するため透過率が 1、金属パターンによって THz 波が遮断されている部分は透過率が 0 になっている。この中心からレンズ外周部から中心に向けた透過率の分布を 3.3 の設計フローにのっとり設計する。ちなみにレンズ通過後の強度はレンズ面積中の開口部分に依存するため、開口部分の総面積は大きいほうが望ましい。表 3-1 は本研究で設計したレンズの条件（レンズ直径 100 mm、焦点距離 75 mm）と、レンズ中央から半径方向に向かった 0 と 1 で表現された透過率分布（Transmittance function）を示している。Transmittance function はレンズ外周部から中心に向けた各単位領域の透過率を表現した 2 値の行列であり、本研究では半径方向に 100 の単位領域に分けて計算を行った。ここでは 0 と 1 の 200 個の数値を簡易に表記するため 12 進数で記している。

THz-SOL のパターンは金属の薄膜を使って制作している。ガラス基板（厚み 400 μm ）上にバッファ層としてクロム 10 nm の層、その上に THz 波の透過・非透過領域形成のための金の薄膜 300 nm を蒸着、パターンはフォトリソグラフィによって作製した。この時、金の薄膜の厚みは THz 波を完全に遮断するため表皮深さ（skin depth）以上となるように設計する必要がある。表皮深さとはある材質に入射した電磁界が $1/e$ に減衰する距離のことであり、表皮深さ δ は以下の式で計算される。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad (16)$$

f は周波数（0.1 THz）、 μ_r は比透磁率（ $\mu_r = 1$ ）、 μ_0 は真空中の透磁率（ 1.257×10^{-6} [N/A²]）、 σ は金の伝導率（ 46×10^6 [S/m]）である。式(16)より 0.1 THz における金の表皮深さは 235 nm であり、今回のレンズでは厚みに十分に余裕を持たせるため金の厚み 300 nm を設計値とした。図 3.8 は式(16)から求めた電磁波の各周波数と金の表皮深さの関係を示し

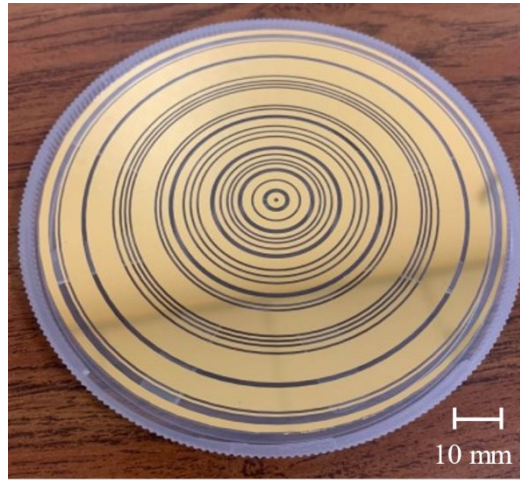


図 3.9 製作した THz-SOL の写真

ている。こちらのグラフから周波数が低いほど表皮深さは大きくなり、特に 0.1 THz を下回ると表皮深さが大幅に大きくなるのが分かる。

最後に図 3.9 に 4 インチのガラス基板上に金とクロムを蒸着して製作した我々の THz-SOL の写真を示す。写真は金属薄膜側から撮影しており、表面が金色になっていることが確認できる。設計の結果、スリットの数は中心に近い領域に多く、外側に向かうほど間隔が疎になっている傾向があることが分かる。

3.5 テラヘルツスーパーオシレーションレンズの評価系

図 3.10 に製作した THz-SOL の性能を評価するために構築した実験系の模式図を示す。計測には Keysight 社製 N5247A ネットワークアナライザに通倍機 N5256X10 を接続して使

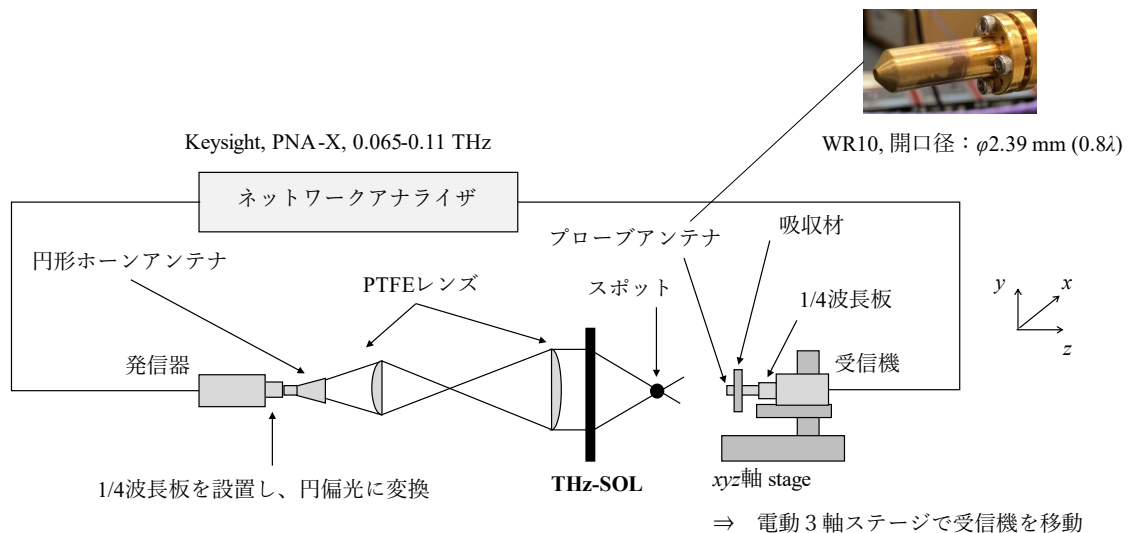


図 3.10 実験系模式図

用した。こちらの計測器の計測範囲は 0.067 ~ 0.11 THz である。発振器側には直線偏光から円偏光に変換するための 1/4 波長板と円形ホーンアンテナ、受信側には円偏光から直線偏光に変換するための 1/4 波長板と $\phi 2.1$ mm のプローブアンテナを接続している。プローブアンテナ側には迷光防止のための吸収材も設置している。SOL には平行光を入射する必要があるため、ホーンアンテナから出たビーム径の拡大、コリメートのため直径 150 mm、焦点距離 100 mm のテフロンレンズを 2 枚設置している。上記テフロンレンズでビーム成型した後 SOL によって生成されたスポットの強度分布は、受信側の通倍機を xyz 3 軸の電動ステージで移動させ計測を実施した。また製作したレンズを使ってイメージングによる分解能の評価も実施しており、その際には受信機は固定、スポットの生成位置に分解能評価用サンプルを設置し、この分解能評価用サンプルを電動ステージで移動させることでイメージングを実施した。

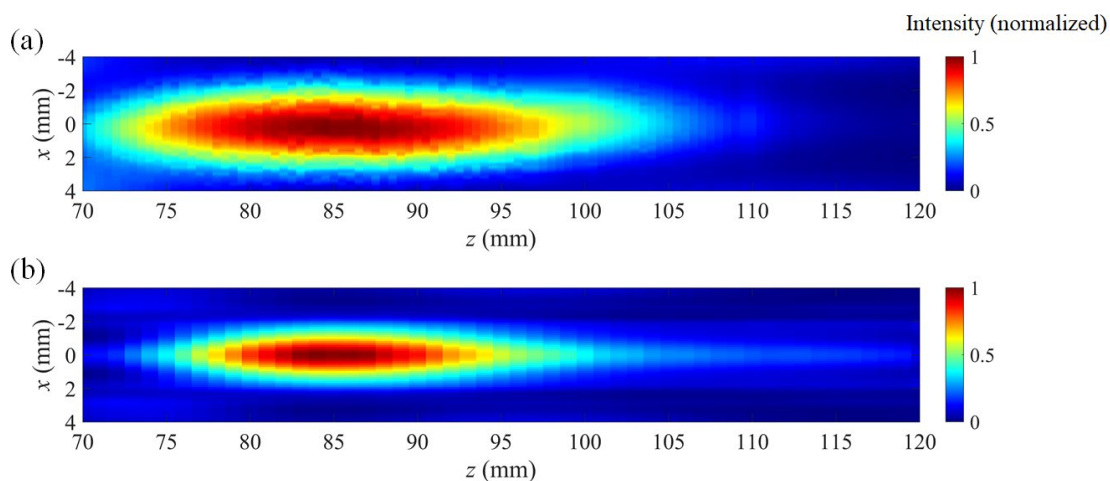


図 3.11 焦点の xz 平面における強度分布の (a)実験結果と(b)計算結果

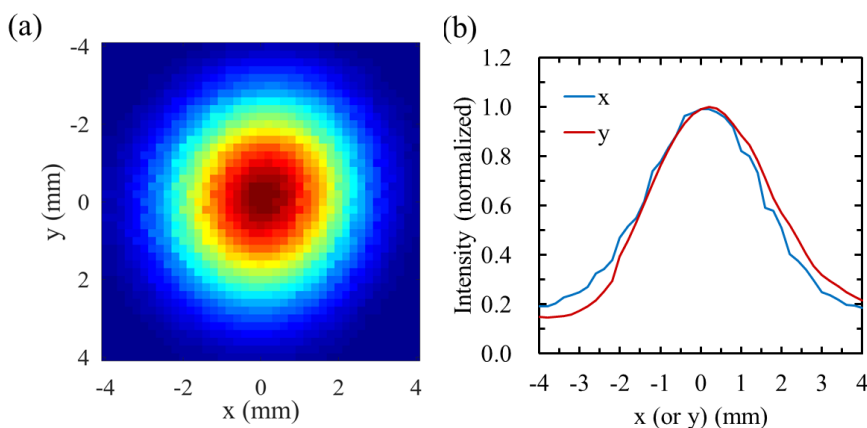


図 3.12 xy 平面から見た焦点の (a)強度分布(実験結果)と(b) $x = 0, y = 0$ 上の強度分布(実験結果)

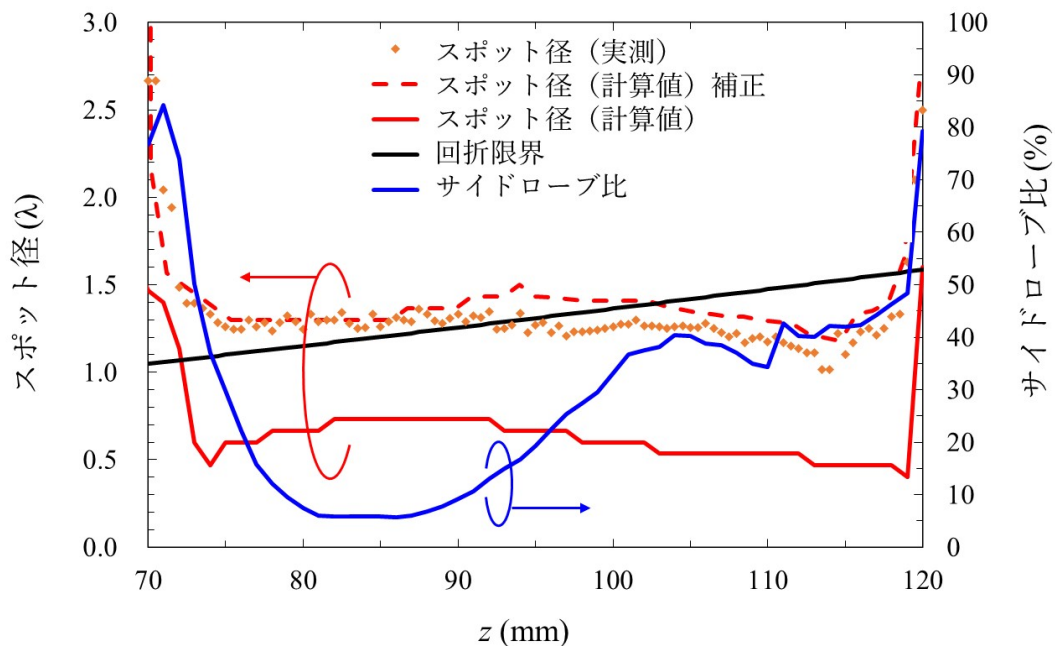


図 3.13 z 方向のスポット径分布、オレンジのプロット：スポット径(実験結果)、赤の実線：スポット径(分解能 $0.1 \times 0.1\text{mm}$ での計算結果)、赤の破線：スポット径(実験系と計測分解能と合わせた計算結果)、青の実線：サイドローブ比、黒の実線：回折限界

3.6 スーパーオシレーションレンズの評価結果と考察

図 3.11 から図 3.13 に製作した THz-SOL によって生じるスポットの評価結果を示す。図 3.11(a) は計測した xz 平面内のスポットの強度分布を示しており、75 mm から 110 mm 付近にかけて集光しており、強度としては 85 mm で最大となっていることが分かる。図 3.11(b) は式(12)による THz-SOL 透過後の強度分布について数値解析ソフトウェア Matlab を使って計算した結果を示している。解析空間はレンズ直径の 4 倍である $400 \times 400 \times 120\text{mm}$ で計算を行った。(a) の計測結果と同様の z の位置に集光していることが分かる。計算上、レンズ面積に対する THz 波透過部の開口率は 28% であり、 $z = 85\text{mm}$ におけるスポットの集光効率が入射したビーム強度の 15.7% となっており、開口部を通過した THz 波のうち 10% 程度ロスをしていることになる。図 3.11 は集光されたスポットのみに注目し表示しているが、SOL の特徴であるサイドローブが $x < -4$ 、 $x > 4$ において発生している。このサイドローブと中心に生成されたスポットの強度の関係（サイドローブ比）については後述の図 3.13 の説明にて述べる。また図 3.11 の(a)実験結果と(b)計算結果における違いの要因についても後述の図 3.13 にて合わせて述べる。

また図 3.12(a) は図 3.11(a) において集光が始まる地点 $z = 75\text{mm}$ における xy 平面の強度分布計測結果であり、(b) は $x = 0$ 上、 $y = 0$ 上の強度分布を示している。青い線が $x = 0$ 上の強度分布、赤い線が $y = 0$ 上の強度分布である。青・赤線共にほぼ重なっており、青い線の半

値全幅が 4.0 mm (1.3λ)、赤い線の半値全幅が 4.0 mm (1.3λ) であることから、スポットがきれいな円形に集光されていることが分かる。さらに図 3. 11 の結果から z 方向に針のように細長いスポット形状であることが分かる。

図 3. 13 は本レンズで生成したスポット (図 3. 11) の z 方向へのスポット径の変化 (左縦軸) とサイドローブ比の変化 (右縦軸) を示したグラフである。まずスポット径について述べる。オレンジのプロットが実験結果、赤の実線が計算結果である。赤の破線は計算する際の空間分解能を補正した結果である。また黒の実線は回折限界の理論式より求めたスポット径を示している。オレンジのプロットと赤の実線のグラフを比較すると $z=75$ mm における実験結果のスポット径が計算結果の 2 倍になっており差があることが分かる。ここで実験結果と計算結果の違いの要因について述べる。受信側プローブアンテナの開口は $\phi 2.1$ mm と計算の分解能よりも大きいことによるものであると考えている。プローブアンテナは導波管の規格 (EIA 規格) WR10 を使用しており、これより小さくすると開口内に THz 波が伝搬しないため現実的に実測できる分解能の下限がこの大きさであった。そこで計算上で空間分解能をアンテナ開口と同じにして計算、プロットしたのが赤の破線である。この赤の破線とオレンジのプロット (実験結果) はよく一致していることが確認できる。黒の実線は回折限界理論によって計算したスポット径であり、赤の破線上のスポット径は 0.6λ と回折限界の 0.55 倍であることが分かる。

次にサイドローブ比について述べる。前述したように本レンズにおいても SOL の特徴であるサイドローブが発生している。図 3. 13 の右の縦軸がサイドローブ比を表しており、スポットが集光されている $z=75$ mm から 100 mm 付近の範囲で 30% を切っている。これは BPSO を用いて最適化する際に、焦点位置におけるサイドローブ比が 30% 以下になるように条件を加えていたからであり、この条件がない場合は非常に小さなスポットが生成できるが強度が大きなサイドローブも生じてしまう設計結果にもなりうる。サイドローブ比はできるだけ小さい方が好ましいが条件が厳しすぎると最適化計算が収束しないため今回は 30% 以下を条件とした。

また z 方向に針状に集光しているということは長い DOF を持つことを意味している。DOF をここではスポット中央のサイズから $\sqrt{2}$ 倍になるまでの距離と定義すると、DOF は 47 mm となり、これは従来レンズの 10.8 倍になる。このように THz-SOL は目標としていた、「回折限界以下のスポット」、「Far-field な焦点距離」、「長い DOF」の全てを満たしていることが分かる。



図 3.14 分解能評価用サンプルの写真

mm、高さ 5 mm の開口部部分を横切るように走査した結果を図 3.15 に示す。図 3.15 の各グラフは(a) 0.9 mm、(b) 1.1 mm、(c) 1.3 mm、(d) 1.5 mm の幅のスリットを走査した結果である。青線はスリット走査結果、赤線はスリットの幅を表現している。(a) は $x = 2 \sim 4$ mm の間で強度が上がっているが、 $4 \sim 6$ mm、 $6 \sim 8$ mm に本来開口部があるはずなのに強度が低く、スリット形状を表現できていない。(b) はスリット部分で強度が上がっているが、 $x = 7$ mm 付近の強度が上がっておらず、正確な形状を表現できているとは言えない。(c) もスリット部分の強度が上がってはいるが、スリットとスリットの間でもピークが発生しており、正確な表現は出来ていない。(a)-(c) と比較すると(d) はスリット部分で強度が上がり、また複数のスリット部分で同程度の強度になっていることが確認できている。これらの結果から THz-SOL を使ったイメージングの性能としては 1.5 mm だと判断した。(b)-(d) ではスリットとスリット

さらにこの THz-SOL の性能を評価するため評価用サンプルを用意し、イメージングを行った。このとき使用した分解能評価用サンプルの写真が図 3.14 である。こちらにも製作した THz-SOL 同様にガラス基板上に金とクロムを蒸着し、フォトリソグラフィ工程にて作製した。このサンプル上には複数の幅のスリット、アルファベットのパターンが設けられており、このうち幅 0.9 mm、1.1 mm、1.3 mm、1.5

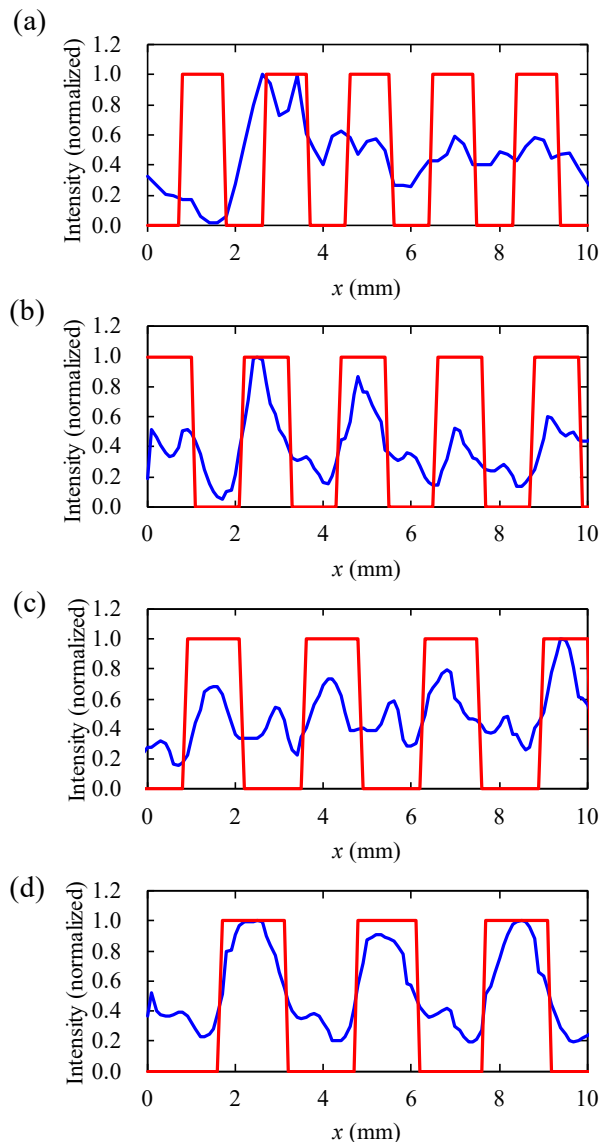


図 3.15 分解能評価サンプルのスリット部走査結果、(a)幅 0.9 mm、(b)幅 1.1 mm、(c)幅 1.3 mm、(d)幅 1.5 mm

トの間であり本来スリットがない部分に小さなピークが発生していることもこれらのグラフから分かる。実験時には分解能評価サンプルとプローブアンテナ先端の間には2 mmの距離があるため、これらピークは隣り合うスリットを通過した THz 波が干渉しあうことで発生したものと考えられる。

これを検証するため角スペクトル法にてスリット2つの干渉パターンを計算した。図 3. 16 は今回計測したものと同一サイズ(高さ 5 mm、幅 1.5 mm)のスリット2個に THz 波を入射した場合の計算結果である。(a)はスリットの形状、(b)はこの2つのスリットを通過した後、スリットから2 mm離れた距離での強度分布である。(c)は(b)における $y = 0$ mm 上の強度をプロットしたものである。図 3. 15(b)のグラフにおける $x = 6$ mm 付近、図 3. 15(c)のグラフにおける $x = 3$ mm 付近に信号があるように干渉によってスリット間に小さなピークが発生していることが確認できている。図 3. 17 は図 3. 15(d)と同じ幅 1.5 mm のスリットを2次元に走査したイメージング結果である。図 3. 15(d)で確認できていたスリット開口部同士の間干渉による弱い強度のピークがあることがこちらのスキャン結果からも確認することができる。また図 3. 18(a)、(b)は線幅 1.5 mm のアルファベット (ASAHI、DMRC) をイメージングした結果である。隣り合う文字の間隔も 1.5 mm 間隔になっており、図 3. 18(a)の“H”と“I”の間、図 3. 18(b)の“M”と“R”の間には図 3. 15(d)、図 3. 17 で述べた干渉のピークが同様に確認できるとともに、文字開口部の強度に対してこの干渉部の強度が半分以下になっていることからどちらも隣り合う文字の形状が区別できていると判断した。ただし“M”の先端部のように徐々に2本の線幅が小さくなり、1.5 mm より幅が小さくなる部分については形状が崩れてしまう様子も確認できている。

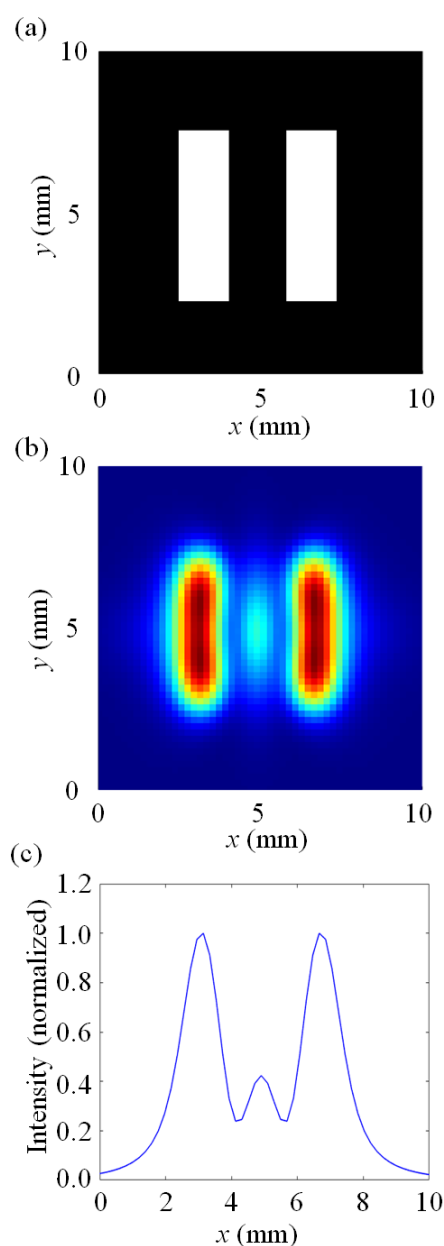


図 3. 16 スリットによる干渉の計算結果、(a)検証に使用したスリット形状、(b)サンプルから 2 mm 離れた位置での強度分布、(c) $y = 0$ における強度分布

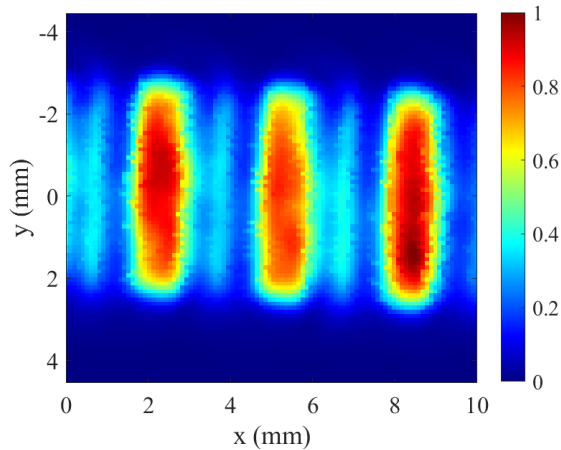


図 3.17 スリット(幅 1.5 mm)イメージング結果

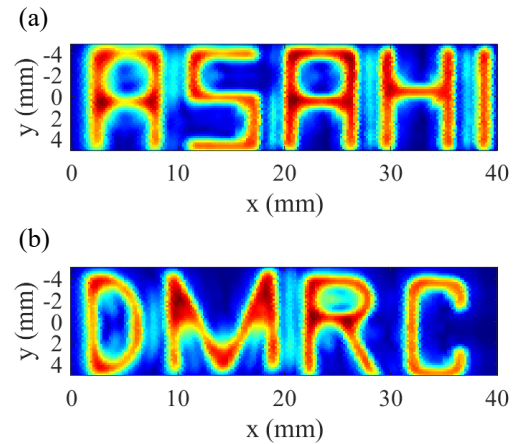


図 3.18 アルファベットパターンイメージング結果 (a)ASAHI、(b)DMRC

3.7 まとめ

これまで顕微鏡用途の可視光、UV 向けとして報告例のある SOL に注目し、同心円型の金属パターンで構成されたレンズを THz 向けに設計、製作、評価を実施した。今回は 0.1 THz ($\lambda = 3 \text{ mm}$) 向けに直径 100 mm、焦点距離 75 mm、単位領域幅 $1/6\lambda$ (0.5 mm) として設計を実施し、結果 $z = 75 \text{ mm}$ から 110 mm の範囲で針状のスポットを生成することができることを実験で確認できた。計算結果との比較も実施し、計測分解能と計算上の分解能を合わせることで両者が一致していることも確認できた。計算結果からスポットは

$z = 75 \text{ mm}$ において 0.6λ と回折限界の 0.55 倍の大きさであり、DOF は 47 mm (従来レンズの 10.8 倍) になる。また製作したレンズの性能を評価するため評価用サンプルを用意しイメージングを実施した結果 1.5 mm の計測分解能があることを確認できた。以上より THz-SOL は目標である 3 つの要素 (回折限界以下のスポット、Far-field の焦点距離、長い DOF) をすべて満たすことのできる技術であることを確認できた。

参考文献

- [1] E. T. F. Rogers *et al.*, Nat. Mater. **11**, 5, 432-435 (2012).
- [2] T. Young, Phil. Trans. R. Soc., **92**, 12-48 (1802).
- [3] G. Yuan *et al.*, Sci. Rep., **4**, 6333 (2014).
- [4] H. F. Talbot, Philosophical Magazine, **3**, 9(56), 401-407 (1836).
- [5] M. Li *et al.*, Sci Rep, **7**, 1335, (2017).

- [6] T. Liu *et al.*, *J. Opt.* **17**, 035610 (2015).
- [7] T. Liu *et al.*, *Opt. Express*, **21**, 13, 15090-15101 (2013).
- [8] T. Liu *et al.*, *Opt. Express*, **23**, 25, 32139-32148 (2015).
- [9] N. Jin *et al.*, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **55**, 556-567 (2007).

第4章 1軸方向に集光するテラヘルツスーパーオシレーションレンズの作製と評価

4.1 はじめに

第3章では同心円型の THz-SOL について設計製作・評価を行ってきた。THz-SOL は THz 波帯で回折限界を超える領域への集光、Far-field の焦点距離、長い DOF の3つの条件を満たすことができる技術であり、パターンによって異なる特徴を生み出すことができる。本章ではさらに具体的な用途を想定し、THz-SOL の実用性について述べる。例えば工業用途ではフィルムのような製品の場合、図4.1のように広い範囲を1度に計測する必要がある。図4.1は1軸方向にのみ集光可能な THz-SOL を生産プロセスに適用した際のイメージを示した模式図であり、従来のシリンダリカルレンズの働きを模したこの THz-SOL を本稿ではテラヘルツシリンダリカルスーパーオシレーションレンズ (THz - Cylindrical SOL (THz-CSOL)) と呼んでいる。また図4.1はフィルム状の製品がロールで搬送されている様子を示しており、製品とともに異物・ゴミが搬送されてくる様子を示している。可視光を利用した検査機では、全面の検査をするために照明を流れ方向にのみ集光し、検査分解能を上げる工夫が一般的に良く行われる。そこで集光の方向を1軸方向に限定して集光する THz-SOL を実現することで、THz 波帯で THz-SOL の適用範囲をより広げることに取り組んだ [1]。

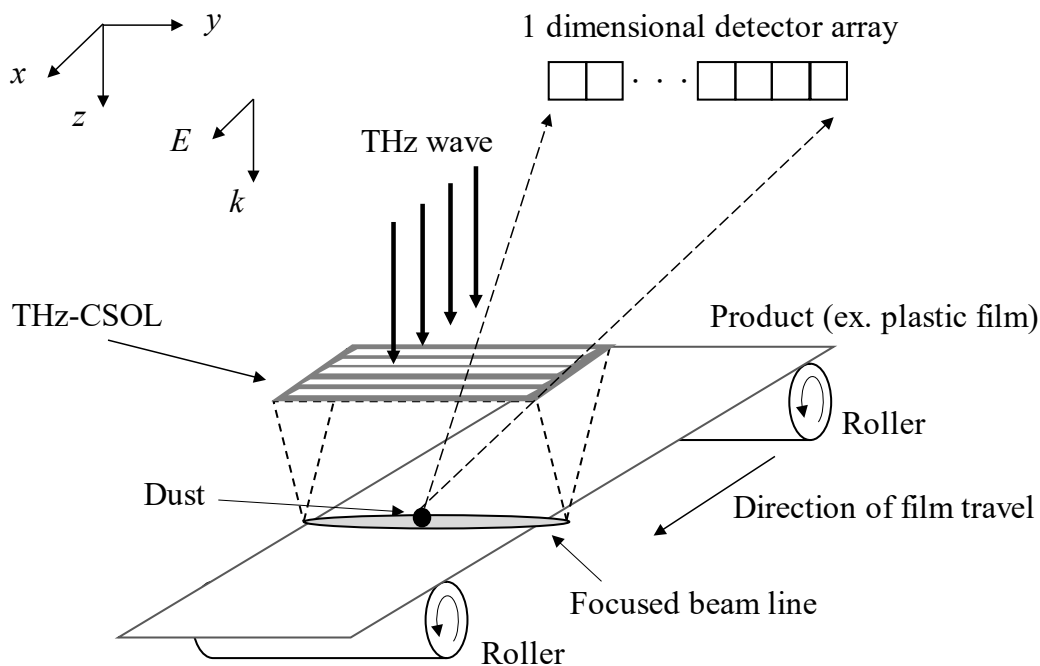


図4.1 THz-CSOL の使用イメージ

4.2 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの

設計

第3章で述べた同心円型のレンズでは円偏光した THz 波のビームを入射することにより、中心の 1 点に極小のスポットが生成されるようにレンズパターンを最適化している。同心円型 THz-SOL の集光効果は偏光の向きとパターンが周期的に並んでいる方向が平行なときに発現する。これはラインアンドスペースの回折格子においてもスリットと直行した方向に電磁波が透過するのはよく知られている[2]が、スリットの幅、間隔を最適化することでスーパーオシレーション効果を発現させ集光の効果させることができる。

ここからテラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの設計フローについて述べる。まず同心円の THz-SOL と同様、最初にレンズの外形を決め、その中を単位領域に区切っていく。本研究ではレンズの大きさを $100 \times 100 \text{ mm}$ 、単位領域の幅を $250 \mu\text{m}$ ($\lambda/12$) とした。図 4.2 はこの工程の模式図であり、中央が単位領域に区切る工程を示している。単位領域への分割が終わったのち、図 4.2 の右図のように区切られた各単位領域の透過率 (0 か 1) を決めて仮のレンズパターンを作製する。次にこのパターンを THz 波が通過した後の強度分布を計算する。第 3 章で同心円型のパターンを通過した後の電場の計算式として式(12)を述べたが、その式を直線偏光で表現できるよう変形したものが以下の式である。

$$E_x(x, z) = \int_0^\infty A(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_0(2\pi lx) 2\pi l dl$$

$$E_z(x, z) = -j \int_0^\infty \frac{1}{q(l)} A(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_1(2\pi lx) 2\pi l dl \quad (17)$$

with $A(l) = \int_0^\infty t(x) g(x) J_0(2\pi lx) 2\pi x dx$

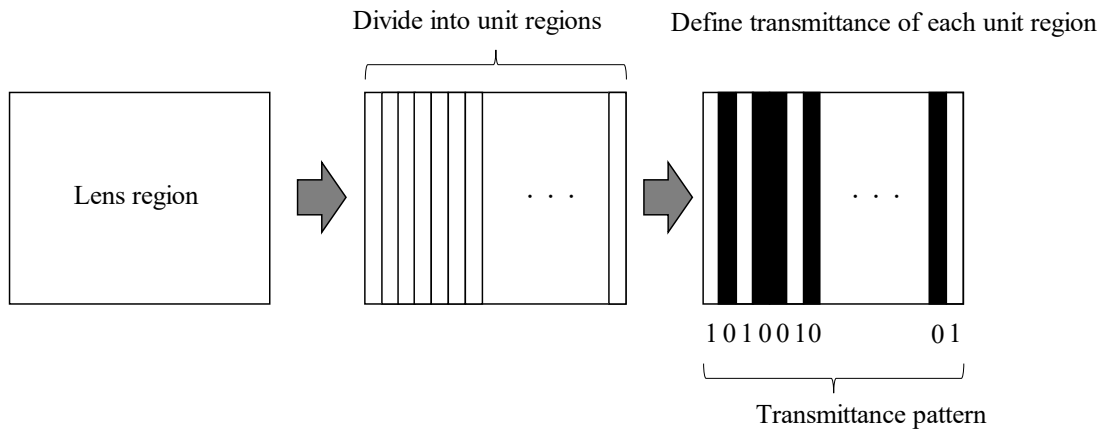


図 4.2 THz-CSOL 設計フローにおける単位領域分割の様子

各変数の意味は式(12)と同様である。また強度は以下のように表現できる。

$$I(x, z) = (|E_x(x, z)|^2 + |E_z(x, z)|^2) \quad (18)$$

式(17)、(18)を用いてレンズ通過後の電場強度分布を $400 \times 400 \text{ mm}$ の空間分計算し、その時のスポット径、サイドローブ比、ピークの強度を評価関数としてレンズのデザインを最適化する。本研究では焦点距離 $z = 70 \text{ mm}$ 、入射するビームは直線偏光の平面波として設

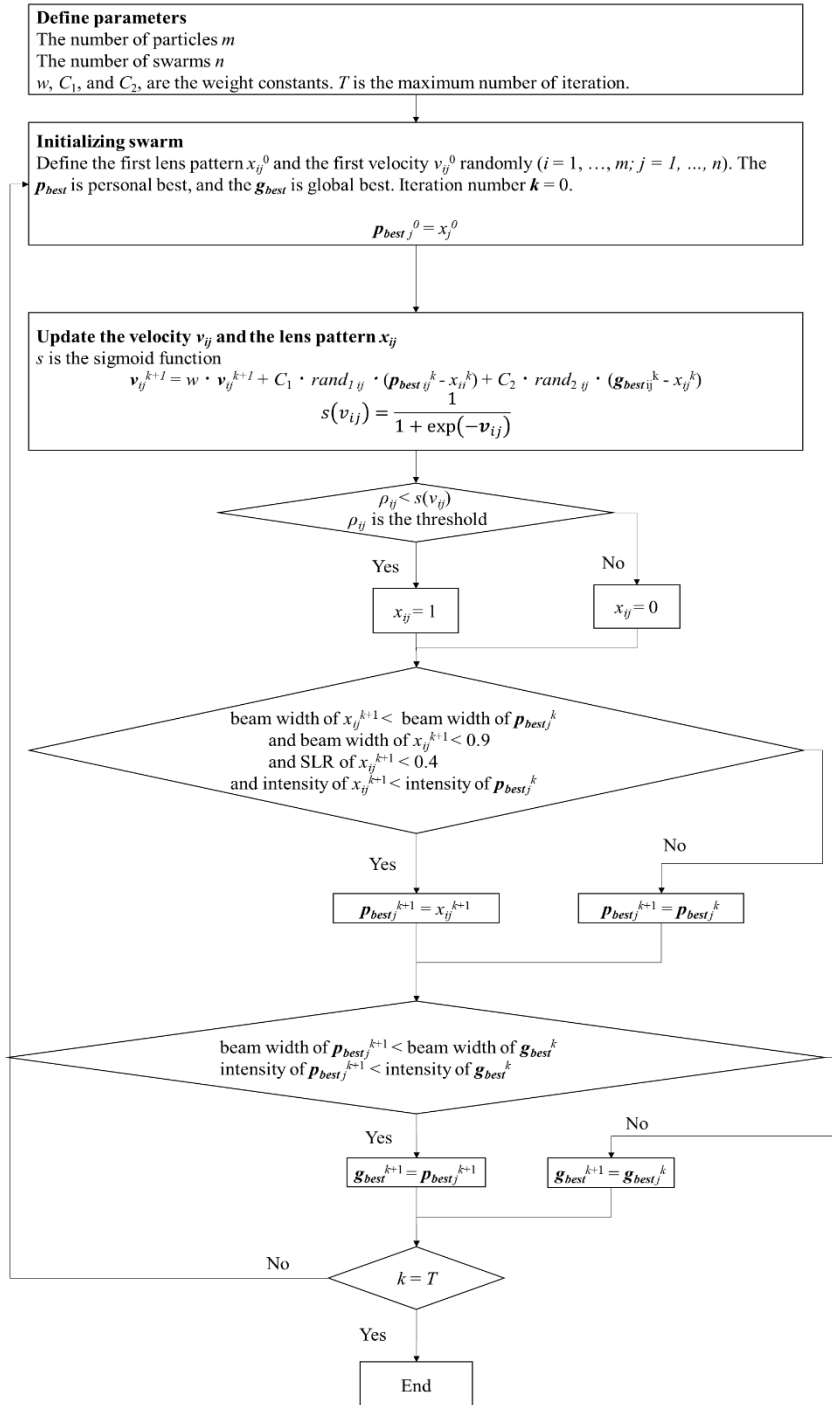


図 4.3 BPSO による THz-CSOL のパターン最適化フローチャート

計しており、最適化の条件としてはスポットの径が回折限界以下となるように 0.9λ 以下、サイドローブ比が 40%以下、の条件を満たすように設計を行っている。

また今回は DOF の長い集光を実現するため焦点位置だけではなく、焦点距離 ± 2 mm の範囲の強度分布も計算し、全ての距離範囲でスポット径が小さくなるようにレンズデザインを BPSO で最適化した。

図 4.3 はこの最適化の流れを示したフローチャートである。まず BPSO で計算するにあたってパラメータを設定する。本研究では 1つの群れの中に含まれる粒子数 $m=200$ 、群れの数 $n=100$ 、各重み係数を $w=0.5$ 、 $C_1=C_2=1$ とし、繰り返し試行回数 $T=1000$ の条件で計算を実施した。次に初回はランダムで決まったレンズデザインを元に任意の焦点位置での電場分布を計算、各群れ毎に最も最適化条件に近いもの（スポットの径が 0.9λ 以下、サイドローブ比が 40%以下）を算出しパーソナルベスト p_{best} とする。さらに各群れ毎にパーソナルベストを求め、その中でも最も条件に近いものをグローバルベスト g_{best} に決める。そのあとはこの g_{best} と p_{best} を使ってレンズデザインを更新するためのベクトル v を算出し、 v と式(15)で求めた値が閾値を超えていた場合、単位領域に設定した透過率を更新する。更新したレンズデザインで最適化条件を満たすかを再度計算し、条件を満たすまで上記計算を繰り返すことで最終的にレンズデザインが最適化される。

ちなみに本研究で最適化の結果、最終的に求められた各単位領域の透過・不透過の分布を第 3 章同様に 12 進数で表現したものが表 4.1 である。また図 4.4 は本研究で設計したレンズデザインである。白い部分が THz 波透過部分、黒い部分が不透過の部分である。この

表 4.1 設計したレンズの透過率分布 (0 or 1) を 12 進数で示したもの

Our designed transmittance pattern	EF169 33BAA 53203 2049A CE1E8
------------------------------------	-------------------------------

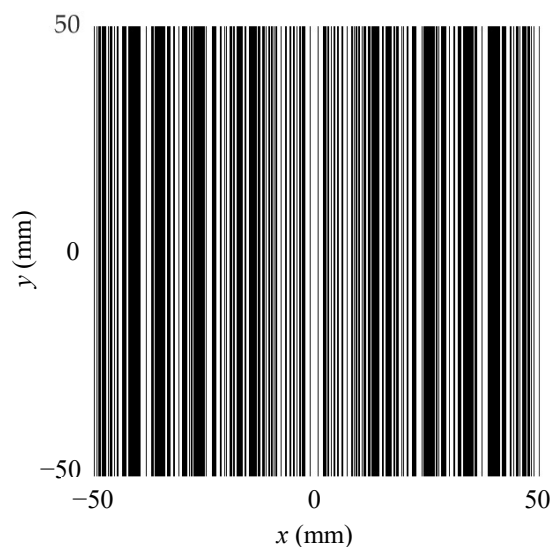


図 4.4 設計した THz-CSOL のパターン（白い領域：透過部、黒い部分：非透過部）

レンズも中央付近にスリットが多く、比較すると外周部のほうがスリットの間隔が疎になる傾向が確認できる。

4.3 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの集光性能

設計した THz-CSOL パターンによるレンズ通過後の強度分布を式(17)と数値解析ソフトウェア Matlab を使って計算した結果が図 4.5 である。図 4.5(a) は xz 平面の強度分布を示しており、またこのグラフは面内の最大強度で規格化して示している。このグラフを見ると $z = 70$ mm 近辺に 1 点だけスポットが集光されている様子が確認できる。 $z = 71.2$ mm でスポットの強度が最大になっており、67.7 mm から 76.6 mm の間で集光している。図 4.5(b) は $z = 71.2$ mm における xy 平面の強度分布を示している。 $x = 0$ mm に沿って 1 直線状に集光し、強度が強くなっていることがわかる。 $x = 6$ mm、 -6.1 mm にも少し明るいラインがはいっているが、これはサイドローブが発生していることを意味している。図 4.5(c) は (b) における $y = 0$ mm 上の x 軸方向の強度分布を表しており、中央に鋭いピーク、その周辺に弱いピークが確認できる。このセンターのピークの幅が 0.83λ であり、最適化条件であった 0.9λ 以下という条件を満たしていることがわかる。またサイドローブ比も 30% となっており、こちらも最適化条件 40% 以下を満たしている。

このレンズで集光したラインの強度の入射した THz ビームの総パワーに対する比率は 25.5% であり、従来のレンズ

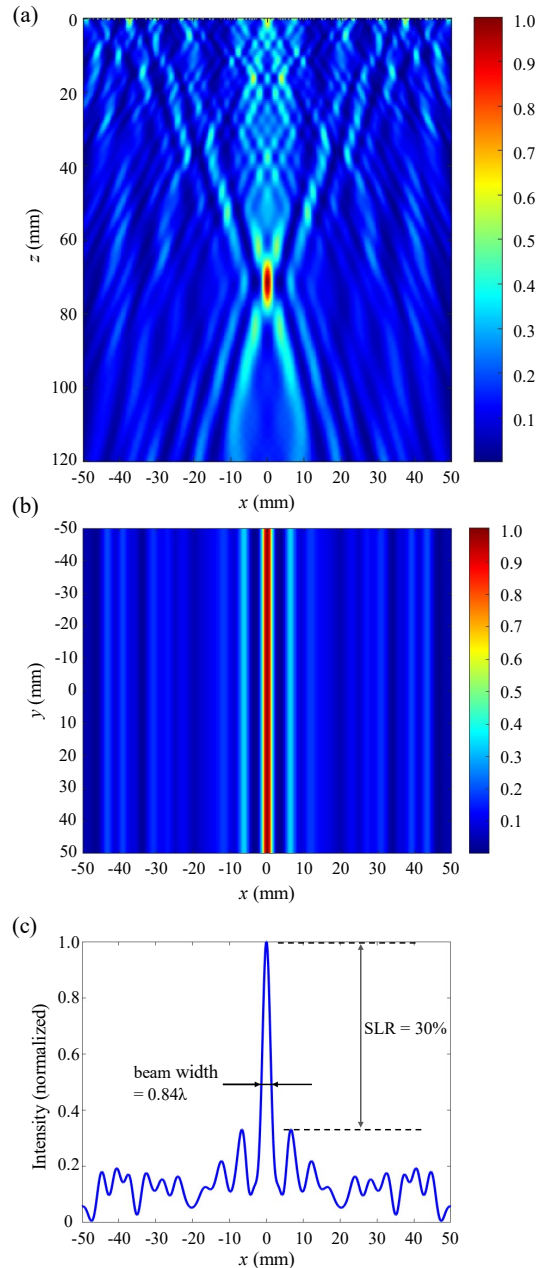


図 4.5 計算結果、(a)SOL 通過後の xz 平面強度分布、(b)SOL 通過後 ($z = 70$ mm) の xy 平面強度分布、(c) $z = 70$ mm、 $y = 0$ mm 上の強度分布

と比較して極小の集光が可能な反面、透過率という観点ではデメリットもある。これは SOL では透過率は開口面積に大きく影響されるためである。集光ビームラインのパワーを向上させることは、CSOL の設計における今後の課題の1つであると考えており、解決策としてパターンを透過、不透過部分と完全に分けるのではなく、パターン厚みを制御し透過率が異なるパターンを複数用意して最適化することでレンズ全体として透過してくる THz 波の強度を上げる方法や、強度に着目して最適化するのではなく、パターンによって透過してくる THz 波の位相遅れが異なる領域を作って本提案レンズと同等の効果を実現する案を考えている。

図 4.6(a)は、集光ビームラインの幅とサイドローブ比の分布を z 方向に沿って示したものである。赤の点は入射波の波長 ($\lambda = 3 \text{ mm}$) で規格化したビーム幅を示し、シアンの点はサイドローブ比の値を示す。黒の実線は回折限界を示している。このグラフからも分かる通り集光ビームラインの最小幅は $z = 71.2 \text{ mm}$ で 0.83λ (2.5 mm) となり、サイドローブ比も 32.9%と最適化規準を満たしている。 0.83λ のビーム幅は回折限界より約 21%小さく、さらに、 $z = 67.7 \text{ mm}$ から 76.6 mm まで、レンズの解像度は回折限界よりも小さな分解能を維持している。さらに焦点距離 70 mm で大きさが $100 \times 100 \text{ mm}$ の THz-SOL の実効的な NA を計算すると 1.43 となり、従来のレンズでは空气中で実現できない 1 以上の数値を達成していることがわかる。また、この計算結果から本レンズの DOF が 10 mm (3.3λ) と求めら

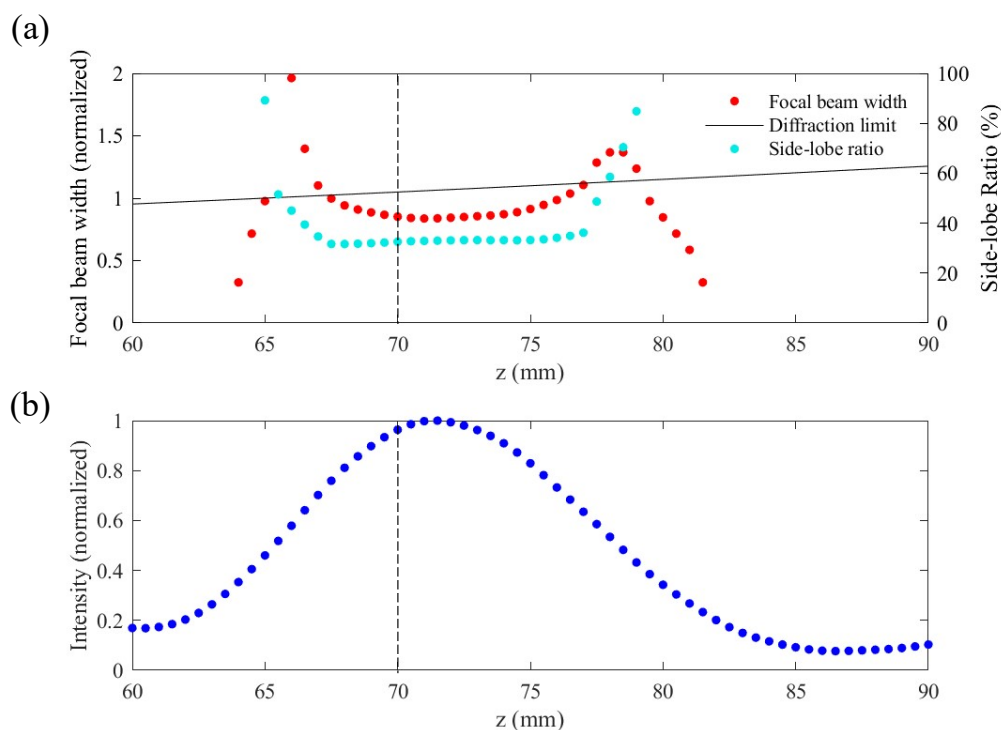


図 4.6 計算結果、(a) z 軸方向に対するスポット径の変化、赤の点はスポット径、シアンの点は再度ローブ比、黒の実線は回折限界、(b) $x = 0 \text{ mm}$ 、 $y = 0 \text{ mm}$ 上の z 軸方向への強度分布

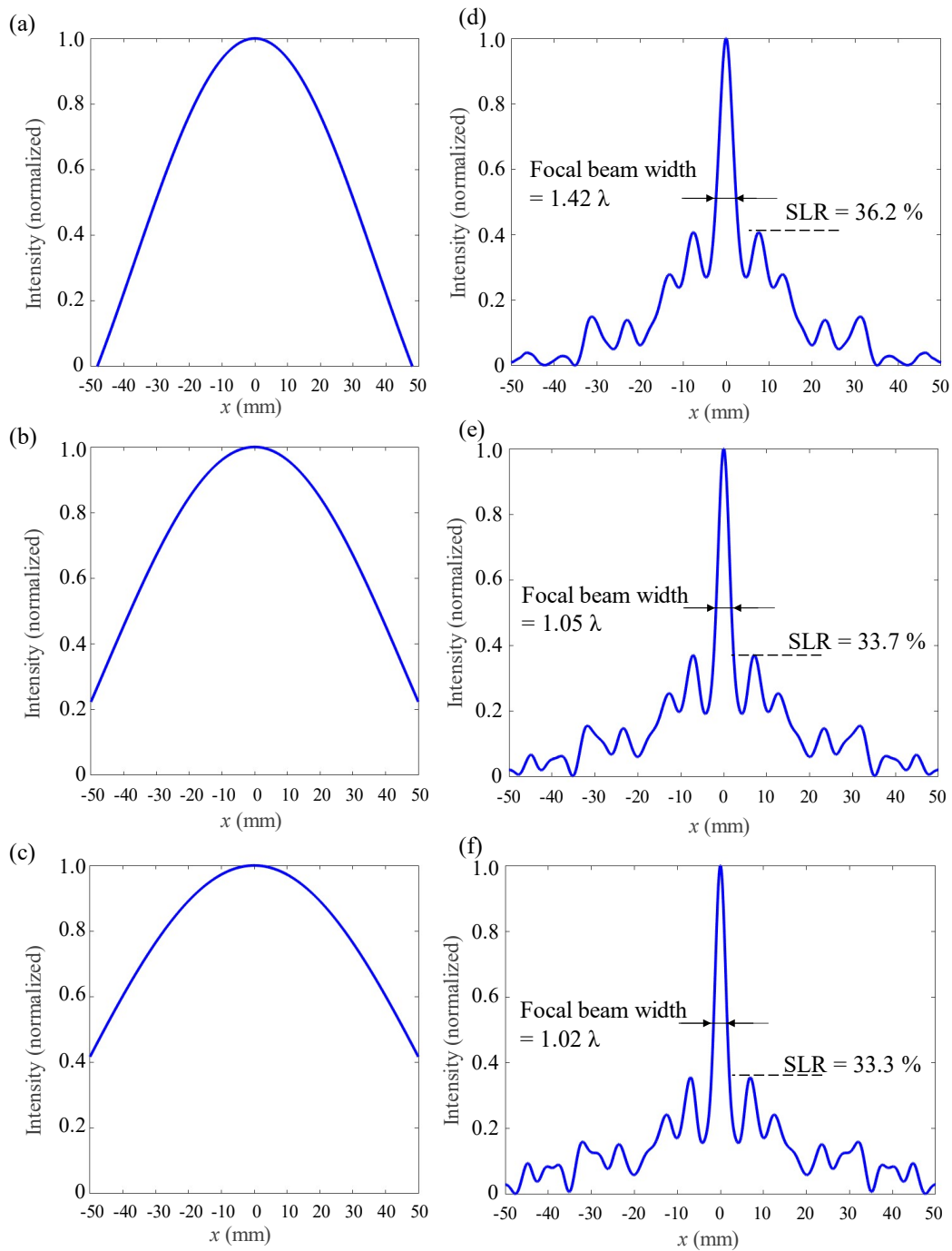


図 4.7 入射するビームの強度分布の影響比較、(a)-(c)入射するビームの強度分布、(d)-(f) $z = 70 \text{ mm}$ 地点における x 軸方向の強度分布

れる。同じ径、焦点距離の従来レンズでは DOF は 8.8 mm となるため、THz 波向けレンズとして重要である DOF も従来レンズの性能を上回っているといえる。

ここで、DOF は $\lambda/(2NA^2)$ として計算した[3]。従来レンズの場合、DOF が長くなると NA が小さくなってしまいが、これまでの結果から SOL ではこれが当てはまらない、ユニークな

特徴を持つといえる。図 4. 6(b)は、 z 方向に沿った強度プロファイルを示している。強度は $z = 71.2$ mm で最大となり、集光したビーム幅が回折限界より小さい範囲、つまり $z = 67.7$ mm から 76.6 mm までの範囲では、ピーク強度の 68.4%を維持していることがわかる。レンズ設計時には平面波を想定して計算を実施したが、入射ビームの強度分布が集光に影響することは予想できたため、その集光性能に与える影響についても検討している。

図 4. 7 (a)-(c)は、1次ベッセル関数 $J_0(s)$ を用いて計算した入射ビームプロファイルであり、図 4. 7 (a)、(d)のプロットでは $s = y/2$ 、図 4. 7(b)、(e)では $s = y/2.5$ 、図 4. 7(c)、(f)では $s = y/3$ として計算した。図 4. 7(a)は $x = \pm 50$ mm において強度がほぼ 0 になっているのに対し、図 4. 7(b)では $x = \pm 50$ mm において強度が約 0.2、(c)では $x = \pm 50$ mm において強度が約 0.4 になっており、(a)-(c)の順にビーム中央からの変化が緩やかになっている。焦点距離 ($z = 70$ mm) における強度パターンを図 4. 7(d)-(f)に示すが、これらのグラフを比較すると入射ビームプロファイルが中央からの強度変化が緩やかなほど、集光されたビーム幅とサイドローブ比が小さくなることがわかる。これはレンズの外側の強度が弱くなることで、実質的な NA が小さくなっていると考えられる。ここまで入射するビームの強度分布について比較してきたが、そのビームを発振する THz 波源として代表的なものに IMPATT ダイオード、ガンダイオード、共振トンネルダイオード等がある[4-6]。これらの THz 波源の放射するビームには強度分布とともに放射する周波数にも多少の広がりを持つ。THz-SOL のパターン寸法は入射する波長によって決まるため、複数波長が同じパターンに入射された場合、波長毎に集光位置・スポットサイズが決まり、結果として各波長の集光結果を重ね合わせた形の強度分布となる。そのため、ここまでは理想的に単一の周波数を想定し計算してきたが、実際の機器を想定して THz-CSOL の性能の周波数依存性についても評価した。市販されている CW の THz 光源 (ex. TeraSense 社、IMPATT-Diode) の周波数帯域幅は数十 kHz であり、その範囲を含むよう広く周波数を変化させ集光性能の変化、サイドローブ比の変化を計算した。

0.1 THz 向けに設計した THz-CSOL に対して、入射する周波数を変化させたときの集光ビームの幅を比較した結果を図 4. 8(a)に示した。青のプロットが 0.098 THz を入射した場合、赤のプロットは 0.1 THz を入射した場合、緑のプロットは 0.102 THz を入射した時の結果を示している。設計周波数より低い 0.098 THz の結果を見ると 1 mm 焦点距離が短くなっていることが確認できる。逆に設計周波数より高い 0.102 THz を入射した結果を見ると 2 mm 焦点距離が長くなっている。つまり THz-CSOL の焦点距離は周波数が低くなると短くなり、高くなると長くなる。これは従来のガラスや樹脂のレンズでは屈折率の周波数依存性によって、周波数が高くなると焦点距離が短くなる特性とは逆の現象である。THz-CSOL の場合、入射するビームの周波数が小さくなるとスリットの幅に対して波長が長くなるため、回折効果が強くなり焦点距離が短くなっていると考えている。

図 4. 8(b)は、入射ビームの周波数を 0.091 THz から 0.105 THz まで変化させたときの $z = 70$ mm における集光されたビーム幅とそれに対応するサイドローブ比を示している。赤の

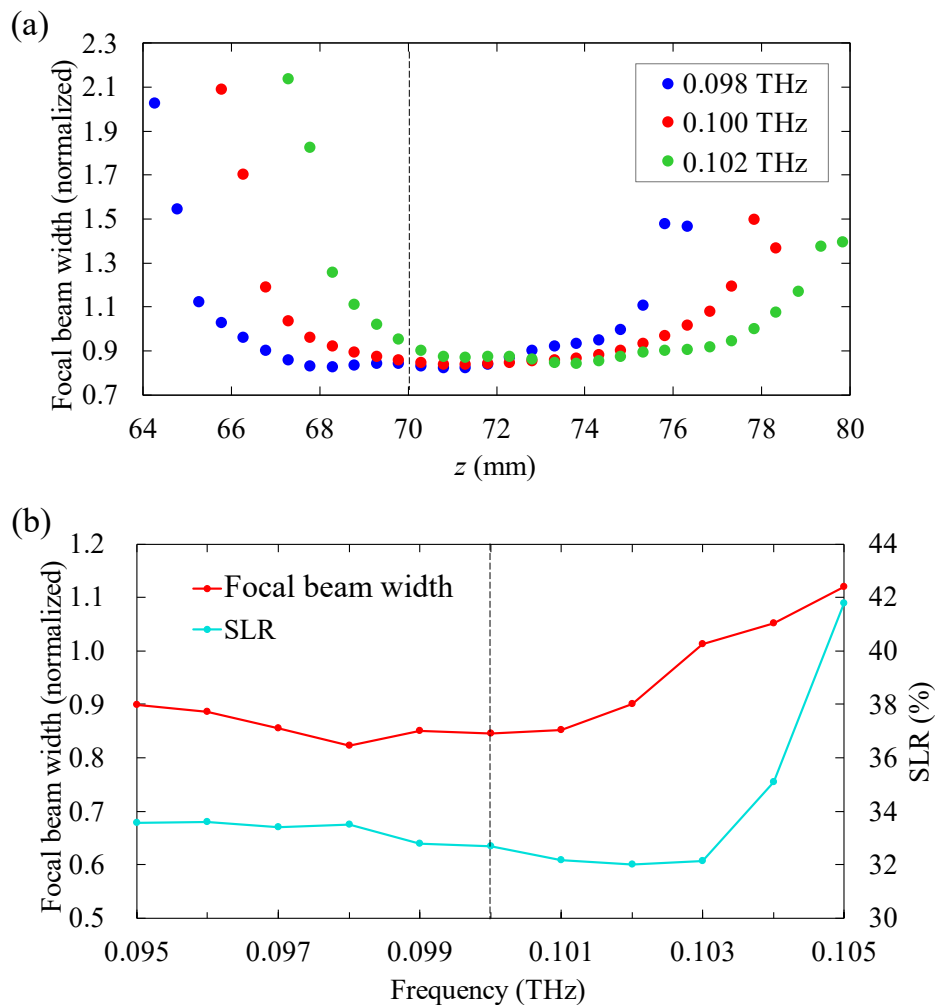


図 4.8 THz-CSOL の周波数依存性、(a)同じ SOL に入射ビームの周波数を変えたときの集光されたビーム幅比較（青：0.098 THz、赤：0.100 THz、緑：0.102 THz）、(b)0.091 THz から 0.105 THz まで入射ビームの周波数を変えたときのビーム幅とサイドローブ比 (SLR)比較（赤：集光されたビーム幅、シアン：SLR）

実線は集光されたビームの幅を示し、シアンの実線はサイドローブ比を表している。設計周波数から離れるほど、集光されたビーム幅は広くなり、集光効率は悪くなる。このグラフから、0.1 THz では集光ビーム幅とサイドローブ比がともに小さくなるように最適化されている範囲に入っていることが確認できる。また、0.093 THz から 0.103 THz の範囲では、サイドローブ比が 35%以下に収まっていることも分かる。さらに、0.093 THz から 0.102 THz の範囲では、焦点ビーム幅は 0.9λ 程度に留まっており、これは市販の IMPATT ダイオード等 CW の THz 光源の周波数帯域よりも十分に広い範囲で集光することが確認できた。

今回設計した THz-CSOL は広い周波数帯域に最適化されておらず、単一周波数でデザインを設計したが、最適化の際に複数の周波数による計算結果を用いることで、広い周波数帯域で集光ビームを生成できる SOL を設計することは可能であると考えている。

4.4 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの製作

ここまで $f = 70 \text{ mm}$ の THz-CSOL 設計結果を使って THz-CSOL の特性を評価してきた。ここで 0.1 THz 向けに $f = 50 \text{ mm}$ 、 100 mm の THz-CSOL を新たに設計製作を行い、実験にて評価を実施した。この 2 種の THz-CSOL の設計結果を図 4.9 に示す。図 4.9(a)、(b) が $f = 50 \text{ mm}$ のレンズの設計結果、(c)、(d) は $f = 100 \text{ mm}$ のレンズの設計結果を示している。(a)、(c) はそれぞれのレンズのパターンの模式図であり、白い部分が THz 波透過部分、黒い部分が不透過部分である。図 4.9(a) の焦点距離が短いほうがレンズ中心付近の白い部分(透過部分)の面積が大きい。また(b)、(d) はレンズ通過後の yz 平面の強度分布を表しており、(b)、(d) 各々の設計焦点距離付近で集光されている様子が確認できる。図 4.9(b) において焦点距離 z

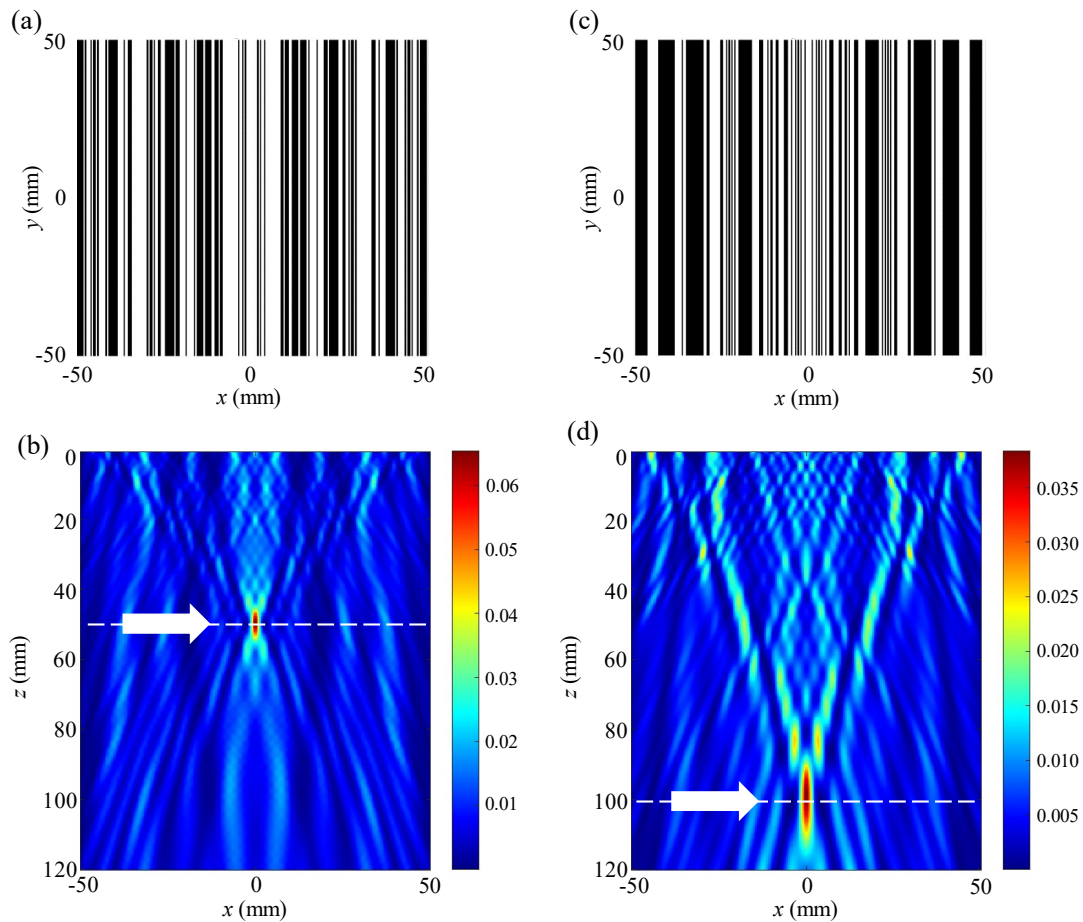


図 4.9 設計した焦点距離が異なる 2 種類の THz-CSOL 計算結果、(a)、(b) $f = 50 \text{ mm}$ (16.6λ) の THz-CSOL、(c)、(d) $f = 100 \text{ mm}$ (33.3λ) の THz-CSOL、(a)、(c) 設計した THz-SOL の模式図 (黒い部分が不透過、白い部分が透過部)、(b)、(d) レンズ通過後の yz 平面の強度分布

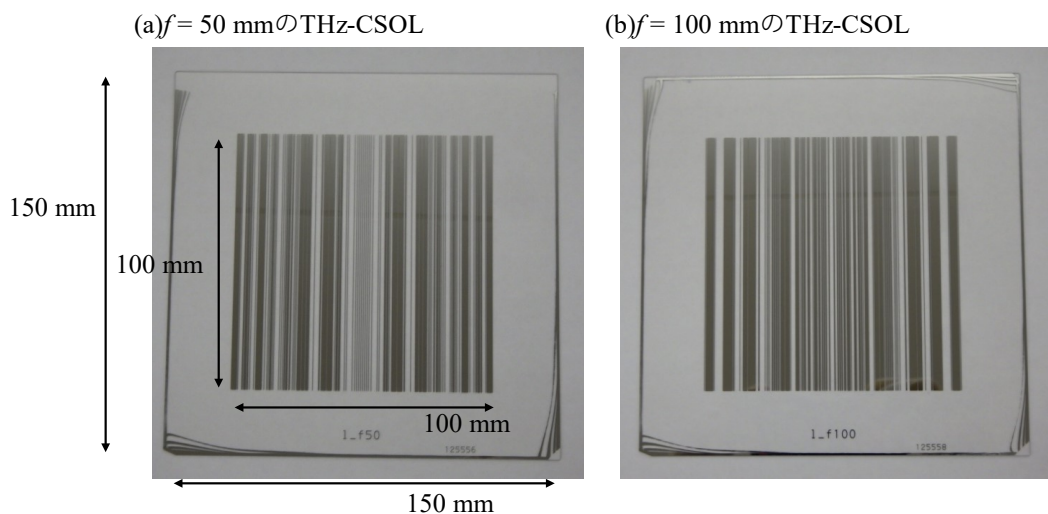


図 4.10 製作した焦点距離の異なる 2 種類の THz-CSOL、(a)焦点距離 $f=50$ mm、(b)焦点距離 $f=100$ mm

$f=50$ mm における集光されたビームの幅は 2.1 mm (0.74λ) であり、回折限界の 0.86 倍を実現している。加えて DOF は 6 mm (2λ) と目標数値 5 mm を超える。一方、図 4.9(d)でも焦点距離 100 mm 付近に集光されている様子が確認でき、こちらの集光されたビーム幅 3.2 mm (1.06λ)、DOF = 18 mm とこちらもビーム幅、DOF とともに目標をクリアできていることが分かる。

これらのレンズをフォトリソグラフィで製作した写真が図 4.10 である。サイズ 150×150 mm、厚み 0.7 mm のガラス基板の上に、 100×100 mm のパターンを Cr を厚み 250 nm 蒸着して製作した。第 3 章で述べた同心円型、第 5 章で議論するメタマテリアル型の THz-SOL ではパターン製作に Au を使用したが、THz 波の透過/不透過領域を分けることができればいため本レンズでは THz 波帯の表皮深さを考慮し Cr のみ 250 nm 蒸着することでレンズを製作した。

4.5 テラヘルツシリンドリカルスーパーオシレーションレンズの

集光性能評価の結果と考察

製作した 2 種のレンズを評価するために図 4.11 の実験系を構築した。発振源に CW の 0.1 THz 発振源 (TeraSense 社、IMPATT-Diode、出力 180 mW) を用いている。本レンズでは第 3 章のレンズと異なり、直線偏光を使用するので、この発振源の先にホーンアンテナを直接接続している。発振源と THz-CSOL の間にはビームコリメート用のテフロンレンズを設置している。THz-CSOL の焦点位置に受信機を設置しており、受信機には 2 次元アレ

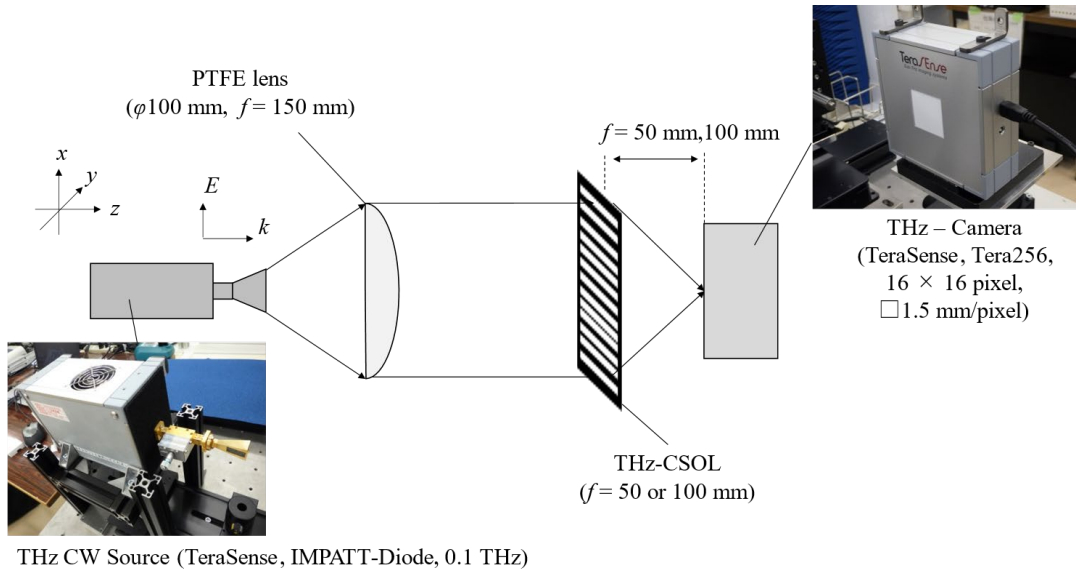


図 4.11 製作した THz-CSOL の評価に使用した実験系模式図

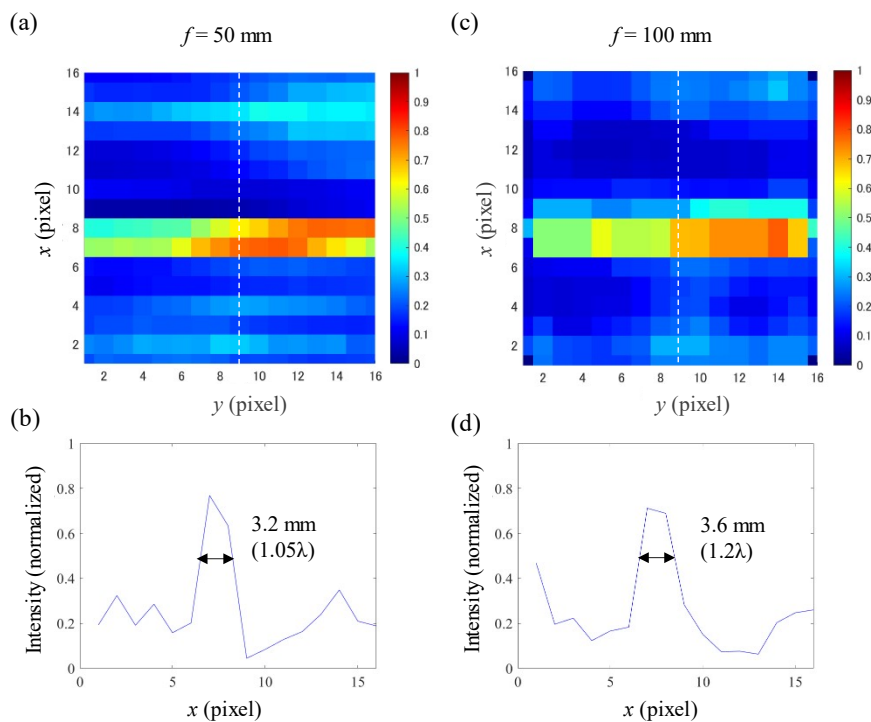


図 4.12 THz-CSOL 評価結果、(a)、(b) $f=50\text{ mm}$ の THz-SOL 評価結果、(c)、(d) $f=100\text{ mm}$ の THz-CSOL 評価結果、(a)、(c) xy 平面の計測結果、(b)、(d) $y=9\text{ pixel}$ 上の x 軸方向の強度分布

この THz カメラ (TeraSense 社、Tera256、 16×16 画素、1 画素のサイズ: $1.5 \times 1.5\text{ mm}$) を用いた。

図 4.12 はこの実験系を使った実験結果を示している。図 4.12(a)、(b)は $f=50\text{ mm}$ の THz-CSOL の実験結果、(c)、(d)は $f=100\text{ mm}$ の THz-CSOL の評価結果である。(a)、(c)はそれぞ

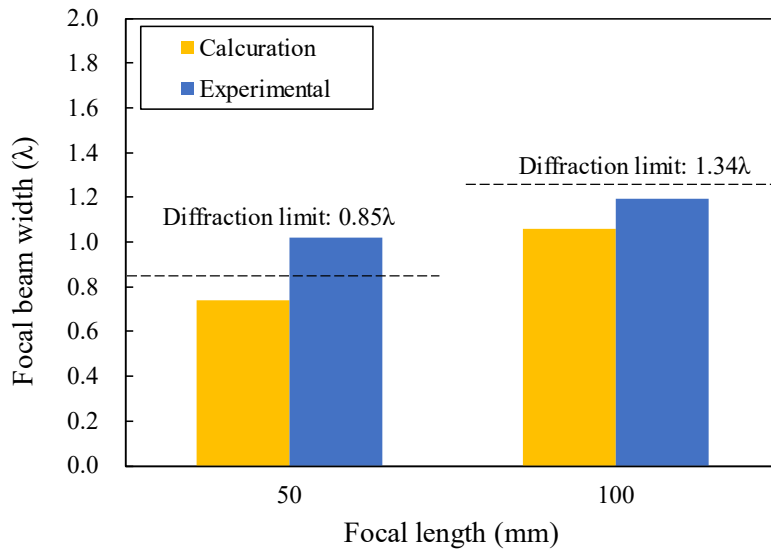


図 4.13 実験結果と計算結果の比較

れのレンズの焦点距離における強度分布計測結果であり、(b)、(d)は $y = 9$ pixel 上の x 軸方向の強度分布を示している。(a)、(c)ともに $x = 8$ pixel 付近で強度が強くなり、集光している様子が確認できる。図 4.5(b)では y 軸方向に一様なのに対し、測定結果では強度勾配があるのは実際の THz 波発振源の放射強度分布の影響だと考えられる。また図 4.12(b)から集光されたビームの幅は 3.2 mm (1.05λ)、図 4.12(d)より集光されたビームの幅は 3.6 mm (1.2λ) となっており、これを計算結果と比較しているのが図 4.13 である。黄色の棒グラフが計算結果、青色の棒グラフが実験結果を示し、黒の点線は計算で求めた回折限界の値である。

実験結果と計算結果を比較すると、 $f = 50 \text{ mm}$ 、 100 mm のレンズの測定結果共に計算結果より大きくなっている。これは計算結果を求める際には計算ステップを $0.1 \times 0.1 \text{ mm}$ で行っているのに対し、実験の結果は受信機の 1 pixel の大きさを計測できる空間的なサイズがきまってしまい、今回使用した装置の 1 画素サイズが $1.5 \times 1.5 \text{ mm}$ と計算に使用しているステップサイズより大きいことが影響していると考えられる。また $f = 50 \text{ mm}$ のレンズは計算結果では回折限界を下回っていたものの、実験結果は回折限界よりも大きい。一方、 $f = 100 \text{ mm}$ のレンズは計算、実験共に回折限界を 11% 下回っており、スーパーオシレーションの効果を確認、焦点距離も 33λ であり Far-field な焦点距離という条件も満たしており、想定した結果を確認できた。 $f = 50 \text{ mm}$ のレンズ評価結果が計算結果と差があるのは、 $f = 100 \text{ mm}$ のレンズと比較してコリメート用の PTFE レンズとの距離が近いこと、PTFE レンズ表面からの反射光の影響を受けやすいためだと考えている。

4.6 まとめ

本章では THz-SOL をより広い分野で活用するため 1 軸方向にのみ集光するよう THz-CSOL を設計し、実験にてその特性を評価した。直線偏光の平行光を入射ビームとして、大きさ $100 \times 100 \text{ mm}$ 、単位領域幅 $250 \mu\text{m}$ ($\lambda/12$)、焦点距離 70 mm となるように BPSO によりデザインを最適化した。結果、 67.7 mm から 76.6 mm の間で集光することが確認でき、焦点距離である $z = 70 \text{ mm}$ 地点にて集光されたビーム幅は 0.84λ 、これは回折限界より 21% 小さく集光できている。また実効的な NA が 1.43、DOF が 3.3λ であり、目標としていた 3 つの条件 (回折限界以下の集光、 10 mm 以上の Far-field な焦点距離、 5 mm 以上の長い DOF) を満たすことが確認できた。また $f = 50 \text{ mm}$ 、 100 mm の THz-CSOL も設計製作と評価を実施しており、 $f = 100 \text{ mm}$ を使った集光の結果回折限界よりも 11% 小さなスポットへの集光を確認することができた。

参考文献

- [1] A. Iba *et al.*, *Sensors*, **21**, 20, 6732 (2021).
- [2] T. Young, *Phil. Trans. R. Soc.*, **92**, 12-48 (1802).
- [3] Y. Kagoshima *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **60**, 118001 (2021).
- [4] Seiya Kawasaki *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **14**, 046501 (2021).
- [5] A. S. Hajo *et al.*, in *IEEE Access*, **8**, 84116-84122 (2020).
- [6] C. F. Destefani *et al.*, *Phys. Rev. B*, **106**, 205306 (2022).

第5章 メタマテリアル型のテラヘルツスーパーオシレーションレンズの作製と評価

5.1 はじめに

第3、4章にて THz-SOL が THz 波帯においても可視光・UV 同様にスーパーオシレーションの効果を発現でき、目標の 3 つの要素（スポットサイズ、焦点距離、DOF）を満たすことができる技術であることについて述べた。第3章の THz-SOL の場合 1 点の極小のスポットを生成するものであったため、高分解能な計測は可能な反面、計測できる範囲が狭い範囲に限られてしまうという課題もあった。第4章の THz-CSOL は線集光するため計測できる範囲は広がるが 1 軸方向に限定される。本章では別のアプローチで 1 枚のレンズで同一レンズ面内に複数の極小スポットを生成できるレンズを開発することで、THz-SOL の応用可能性を広げることに取り組んだ。

5.2 微細な周期構造を利用したスーパーオシレーション効果に関する先行研究

スーパーオシレーションを発生させるためには面内の強度分布に対し複数の空間周波数成分を生み出す必要がある。第3章では同心円型のスリットを用いてこれを実現してきたが、先行研究では波長よりも小さなナノホールが並んだマスクや周期構造物をマスク面内に設けることでスーパーオシレーション現象を発現している例もある[1-3]。Huang[1]は金属上に使用する光の波長 660 nm と比べて非常に小さなナノホールを設けたマスクを使用している（図 5.1）。図 5.1(b)はそのマスクに光（波長 660 nm）を入射し、マスクから 7.5λ 離れた位置で計測した散乱光の様子である、(c)は(b)中の白枠内のスポットの強度分布を示したものである。スポットの FWHM が 320 nm となっており、波長の半分以下のサイズに集光できていることが分かる。このように第3章で使用した同心円型のパターン、第4章で使用したラインアンドスペースのパターン以外でもスーパーオシレーションを発生させ、回折限界以下への集光を実現させている。

また、同様にナノホールの代わりに波長より小さな構造物を周期的に配置し特殊な特性を発現させる“メタマテリアル”を利用してもスーパーオシレーションの効果を発現することができる。Roy は可視光向けに円形のスリットを複数並べたものを単位パターンとしたメタマテリアル型の SOL について報告している[2]。このレンズは波長 800 nm をターゲットにして設計製作されており、このときのスポット径は 0.2λ と回折限界以下の集光ができていることが報告されている。この回折限界以下の集光ができているのはスリットの配置によりスーパーオシレーション現象に由来していることについても述べられている。他に

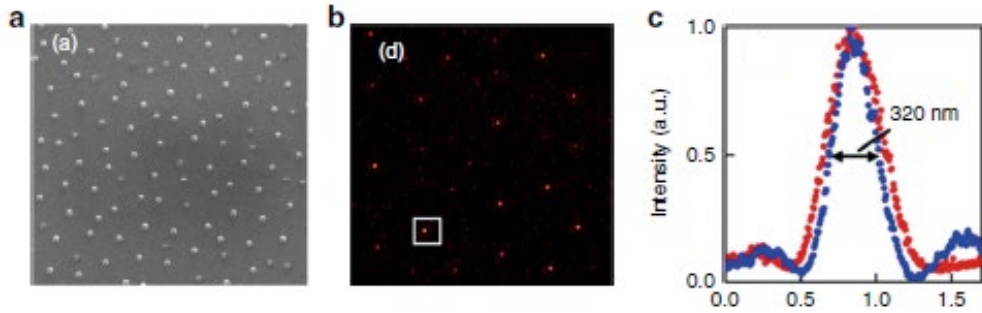


図 5.1 ナノホールを利用したスーパーオシレーションによる集光[1]、(a)ナノホールマスクの SEM 画像、(b)マスクから 7.5λ の距離の散乱光強度分布、(c)スポット強度分布 (b の白枠内)

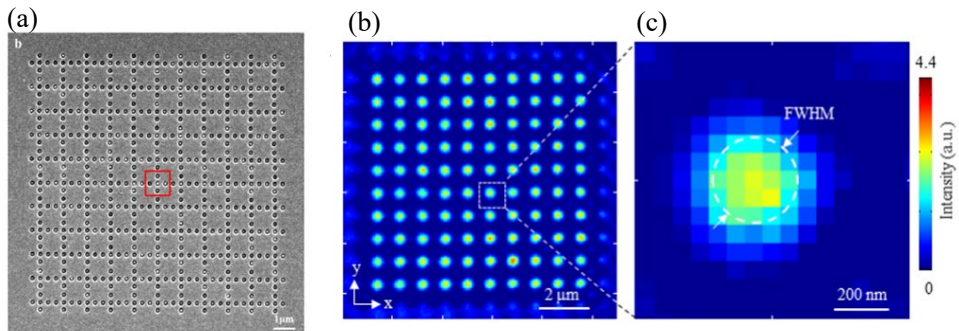


図 5.2 メタマテリアル型スーパーオシレーションレンズ 1[2]、(a)レンズ SEM 画像、(b)強度分布 (実験結果)、(c)単位パターン毎のスポット強度分布

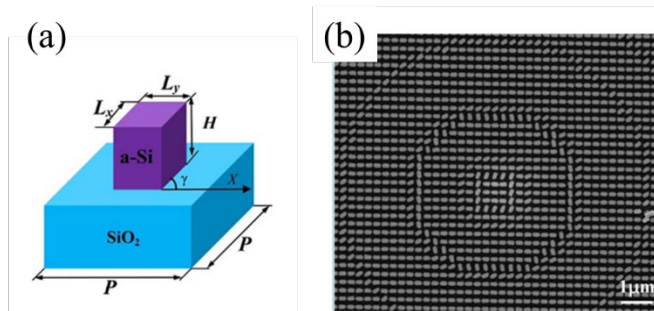


図 5.3 メタマテリアル型スーパーオシレーションレンズ 2[4]、(a)メタマテリアル単位パターン、(b)単位パターンを同心円状に配置したレンズ

も Liao ら[4]は SiO_2 基板の上にアモルファスシリコンで作製された直方体の構造をメタマテリアルの単位パターンとし、この単位パターンを基板上に同心円状に配置することでスーパーオシレーションを起こし実効的な $NA = 0.89$ のレンズを提案している。図 5.3(a)がメタマテレンズの単位パターン模式図であり(b)は単位パターンを同心円状に配置したレンズの写真である。

5.3 メタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーションレンズ

のパターン設計

本研究では波長以下の矩形スリット、円形スリットを5個十字に配置したパターンを単位パターンとしたメタマテリアル型の THz-SOL 製作に取り組んだ。矩形もしくは円形スリットを格子状に一定間隔で並べた場合、このパターンはバンドパスフィルタのように機能する (図 5.4) [5]。Ali ら[5]は図 5.4(a)のような矩形スリットを周期的に配置したパターンを使って THz 波帯のバンドパスフィルタを実現している。図 5.4(b)はパターンの寸法を(c)の表のように変化させたときの透過スペクトルを示しており、寸法によって透過する周波数が増えている様子が分かる。このバンドパスフィルタはマスク全体に同じパターンが配置されているためにこの機能が発現していた。しかし、このパターンの一部にあえて欠けた部分を設けることで単位パターン上を透過した THz 波にマスク面内で位相の偏りを発生させることが出来る[2]。この偏りによって単位パターン中央部を通過した THz 波に周囲のスリットに対しての位相遅れを発生させ、これを利用することで単位パターン直上に集光する効果を発現させる。所望のパターンを設計していくには単位パターンによる吸収損

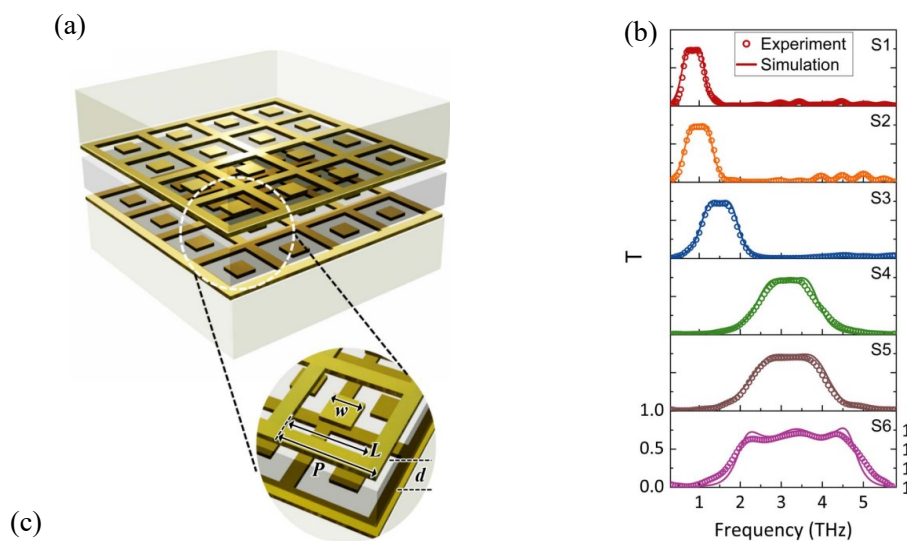


Table 1. Geometrical Parameters of the Broad Bandpass Device^a

Device	P (μm)	L (μm)	w (μm)	d (μm)	Tape	f_0 (THz)	Δf (THz)
S1	86	80	60	33	No. 5603	0.84	0.58
S2	70	66	48	33	No. 5603	1.00	0.77
S3	52	48	36	23	J0010 and No. 5601	1.46	0.86
S4	29	23	17	10	No. 5601	3.10	1.57
S5	28	24	16	10	No. 5601	3.17	2.02
S6	32	28	15	33	No. 5603	3.44	3.20

図 5.4 矩形スリット型メタマテリアルバンドパスフィルタ[4]、(a)メタマテリアルパターン模式図、(b)寸法の異なるパターンによる透過スペクトル、(c)メタマテリアル寸法パラメータ

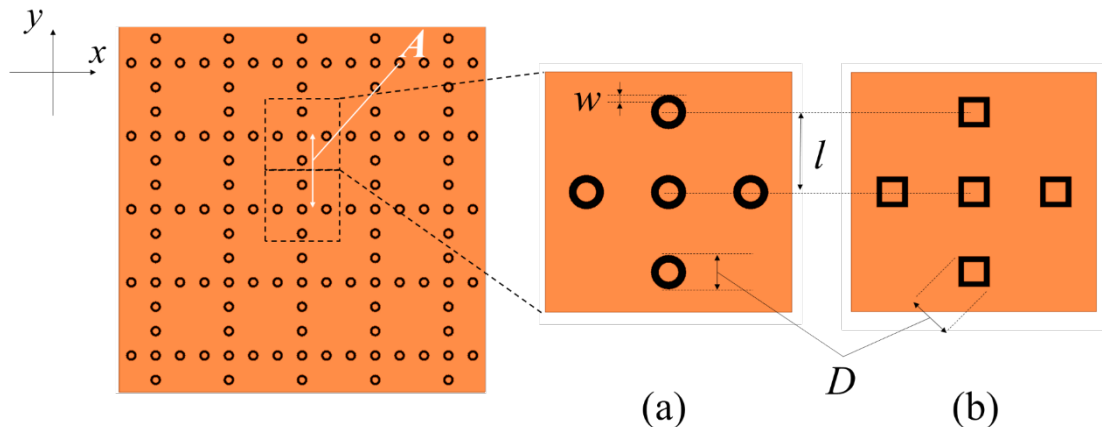


図 5.5 メタマテリアル型 THz-SOL パターン模式図

失、有限サイズ、パターン間の相互作用という 3 つの要因が複雑に関係し合う。そのため第 3 章、第 4 章と同様に設計することは困難なため、これらの課題を考慮して、メタマテリアル型 THz-SOL を設計するために経験的組合せアプローチ[6]を用いて設計を行った。

スリット形状の影響、スリットの大きさ、幅、間隔が集光に与える影響を明確化するため、電磁界解析ソフトウェア HFSS を使用し、各パラメータについて有限要素法による計算を行った。単位パターンの周囲に周期境界条件を設け、複数のパターンが周期的に並んでいる状態でレンズ透過後の電場の分布・位相を計算している。

まずスリットの形状による違いを比較する。図 5.5 に矩形、円形それぞれのパターンの模式図を示している。(a)は円形のスリットによって構成された単位パターン、(b)は矩形のスリットで構成された単位パターンであり、十字に 5 個のスリットを並べたものを単位パターンとしている。 D は円形スリットの直径、矩形スリットの対角線であり、入射する THz 波 (0.1 THz) の波長 3 mm に対し十分に小さな $690 \mu\text{m}$ (0.23λ) とした。またスリットの幅 w は $127.5 \mu\text{m}$ 、スリット間隔 l は $1275 \mu\text{m}$ 、単位パターン間の距離 A は $3l$ ($3825 \mu\text{m}$) として設計し、このマスクに円偏光の平面波を入射する設定で計算を行っている。

図 5.6 は円形スリット、矩形スリット、それぞれに THz 波を入射した場合の SOL の集光性能を計算したものである。図 5.6(a)は矩形スリットを使用した計算結果、(b)は円形スリットを使用した計算結果である。両者を比較すると円形スリットを用いたほうがスポットの強度が高くなっており、透過・集光の効率が低いことが分かる。また図 5.6(b)は強度の分布であったが、図 5.6(c)のグラフは位相の分布を示したものである。(b)にてレンズからの距離 8 mm、16 mm に確認できるスポットの前後で位相がマスク中央 ($x = 0 \text{ mm}$) に向かって変化している様子が確認でき、集光している様子が位相の点からも確認することができる。

これらの計算結果からこのメタマテリアル型の THz-SOL は焦点距離の方向(レンズから離れていく方向)に一定間隔で繰り返しスポットを生成するという、他のレンズにはない特

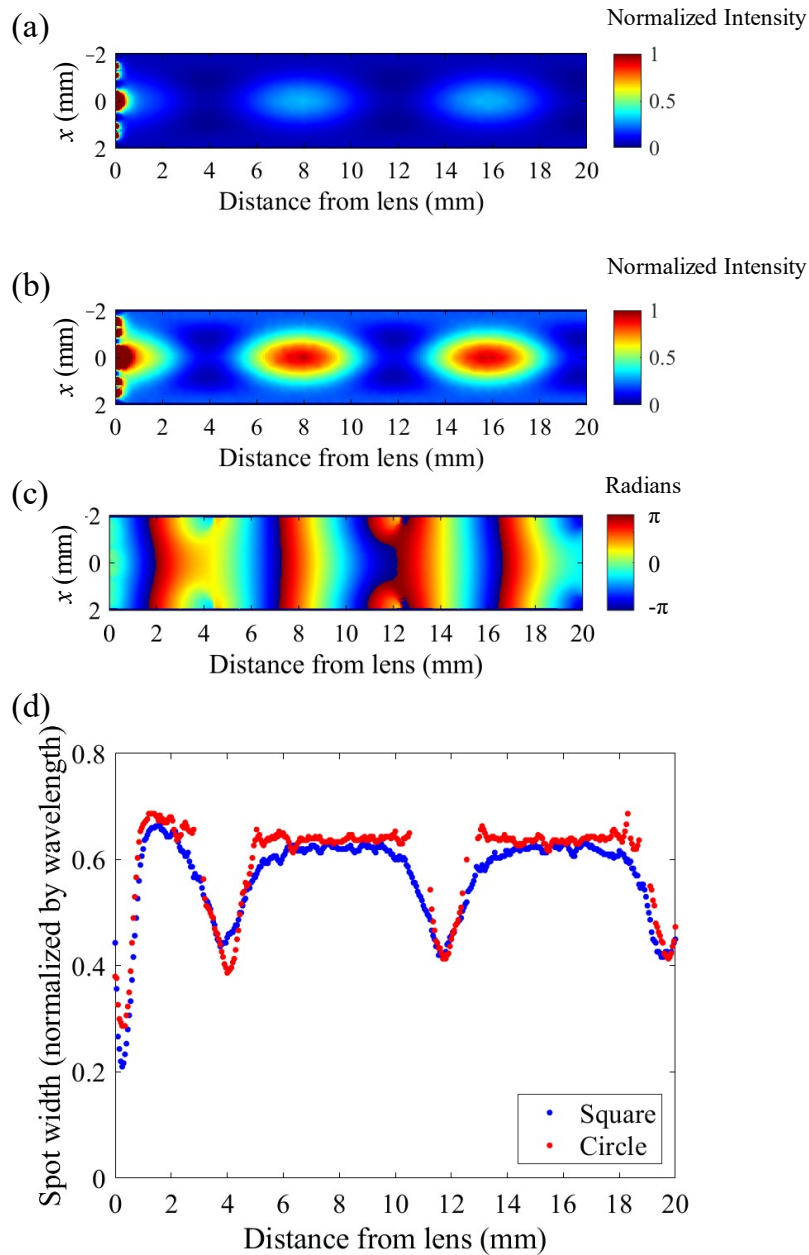


図 5.6 メタマテリアル型の THz-SOL 計算結果、(a)四角パターンの SOL を使用した場合の強度分布、(b)円形パターンの SOL を使用した場合の強度分布、(c)円形パターンの SOL を使用した場合の位相分布、(d) z 軸方向へのスポットサイズの変化 (青：四角のパターン、赤：円形パターン)

徴を持っていることも分かる。図 5.6(d)は図 5.6(a)、(b)で確認できるスポットのサイズを示したグラフであり、両者ともに $z=7.9$ mm、 15.8 mm にスポットが発生している。青のプロットが矩形スリットを使用して計算した結果、赤のプロットが円形スリットを使用した時

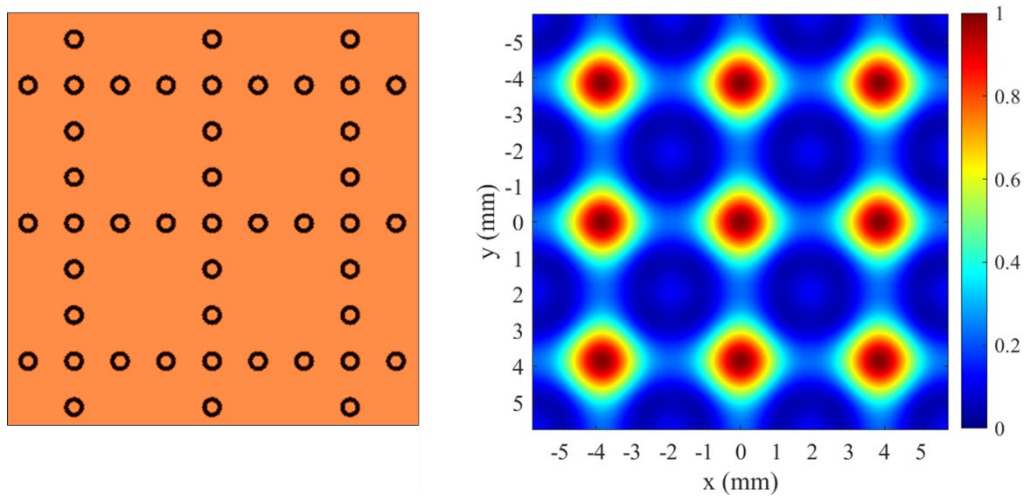


図 5.7 単位パターン 9 個 (3 × 3) のモデルを使った有限要素法による強度分布計算結果

の計算結果である。このグラフを見るとスポットが確認できる $z = 7.9 \text{ mm}$, 15.8 mm においてスポットサイズはほぼ同じであり、スポットサイズに対してスリット形状の影響は小さいことが確認できる。スポットサイズに差が無く、かつスポットの強度が高いため円形のほうがレンズとしての性能が高いことが分かる。

図 5.7(a) はレンズ直上から見たときの模式図、(b) は焦点距離 $z = 7.9 \text{ mm}$ における強度分布を示している。単位パターンを 9 個並べたモデルに周期境界条件を設定し有限要素法で計算した結果である。単位パターン単体のモデルに周期境界条件を設定し有限要素法で計算した結果 (図 5.6) 同様の結果が得られており、面内は周期的なパターンになっていることから、以降は単位パターン 1 個のエリアに限定して計算をしている。各単位パターン直上に小さなスポットが複数生成されている様子が確認できる。

図 5.8 は円形スリットを用いた THz-SOL のスリット径、スリット幅、スリット間隔をそれぞれ変化させたときのスポットの変化を計算・比較したものである。図 5.8(a) のグラフがスリット径を図 5.5 で設計した値から $-20 \mu\text{m}$ 変化させたとき、図 5.8(b) のグラフは $+20 \mu\text{m}$ 変化させたときのスポットの様子を計算したものである。(c) はこのときのスポットの大きさ、(d) は $x=0$ 上の強度をプロットしたものである。これらの結果からスリットの径を大きくした方がスポットの強度が強くなるものの、スポットの発生位置、スポットサイズには影響をしないことが確認できた。

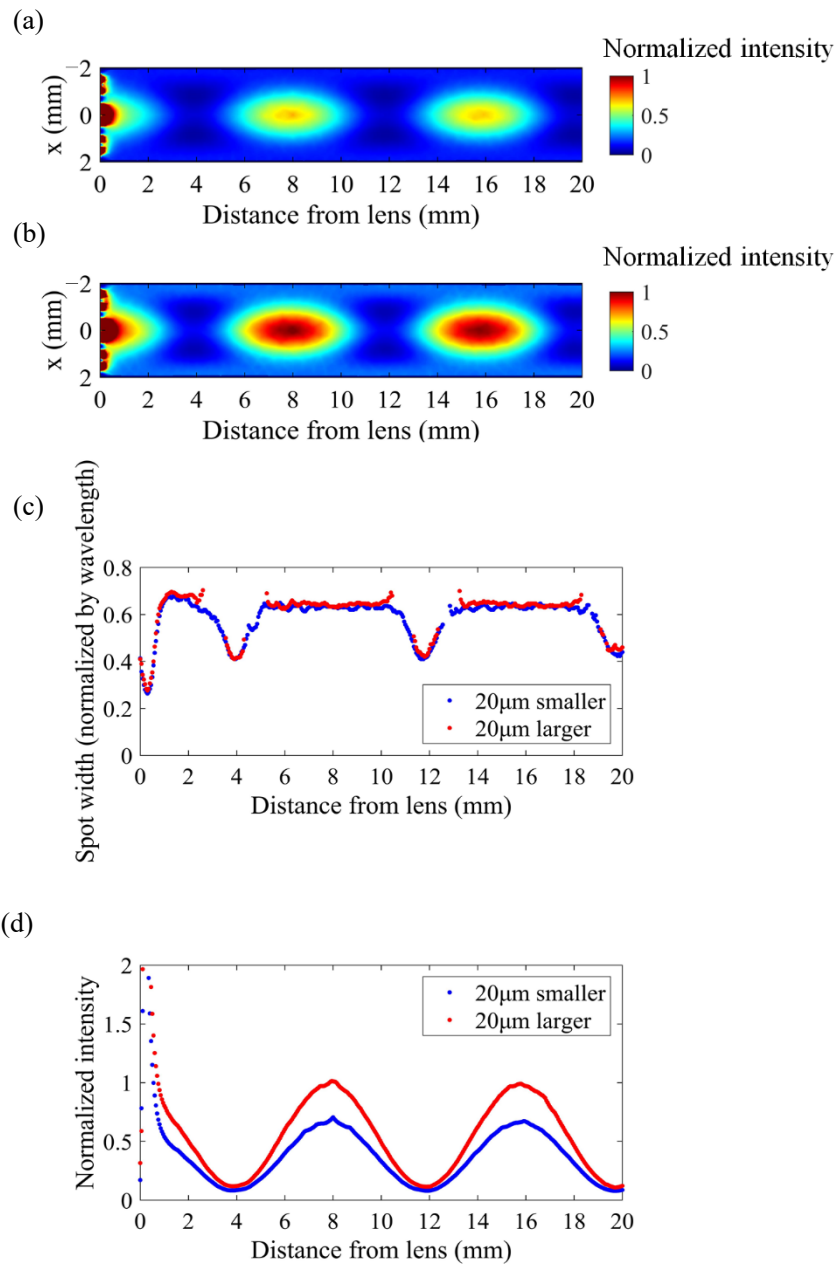


図 5.8 スリット径の変化による影響、(a)スリット径を 20 μm 大きくした場合の強度分布、(b)スリット系を 20 μm 小さくした場合の強度分布、(c) z 方向に対するスポットサイズ、(d) z 方向に対する $x=0$ 、 $y=0$ 上の強度分布

図 5.9 はスリットの幅を変化させた計算結果であり、図 5.9(a)のグラフがスリット幅を 20 μm 太く、図 5.9(b)のグラフが 20 μm 細くしたときの強度分布計算結果である。図 5.9(c) はスリット幅をそれぞれ変化させたときのスポット径を計算したグラフである。赤のプロットが 20 μm 細く、青のプロットが 20 μm 太くしたときの計算結果である。こちらもスリ

ット径を変化させたときと同様に、スポットの強度は変化するもののスポット径・スポット発生間隔は変化しなかった。

図 5. 10 はスリット間隔を変化させた場合の計算結果である。図 5. 10(a)の各グラフは左から今回基準としているスリット間隔 $1275 \mu\text{m}$ に対して $-50 \mu\text{m} \sim +50 \mu\text{m}$ まで $10 \mu\text{m}$ 刻みに変化させて計算した強度分布、図 5. 10(b)各条件におけるスポット径の変化を示している。スリット径、スリット幅ではスポットの発生間隔はほとんど変化しなかったが、スリット間隔の変化に応じて変化していることが分かる。スリット間隔が短くなるとスポットの発生間隔が短く、逆にスリット間隔が長くなるとスポットの発生間隔は広くなる。このように本タイプの焦点距離はスリット間隔で設計できる。このスリット間隔による集光の

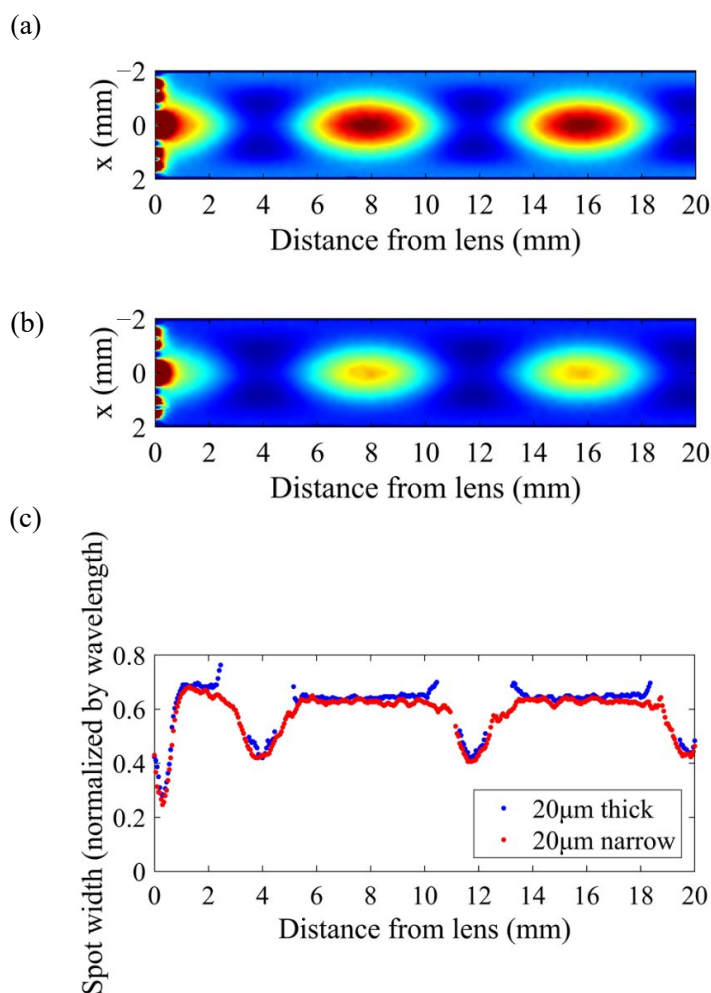


図 5.9 スリット幅を変化した時の影響、(a)スリット幅を $20 \mu\text{m}$ 太くした場合の強度分布、(b)スリット幅を $20 \mu\text{m}$ 細くした場合の強度分布、(c)z 方向に対するスポットサイズ

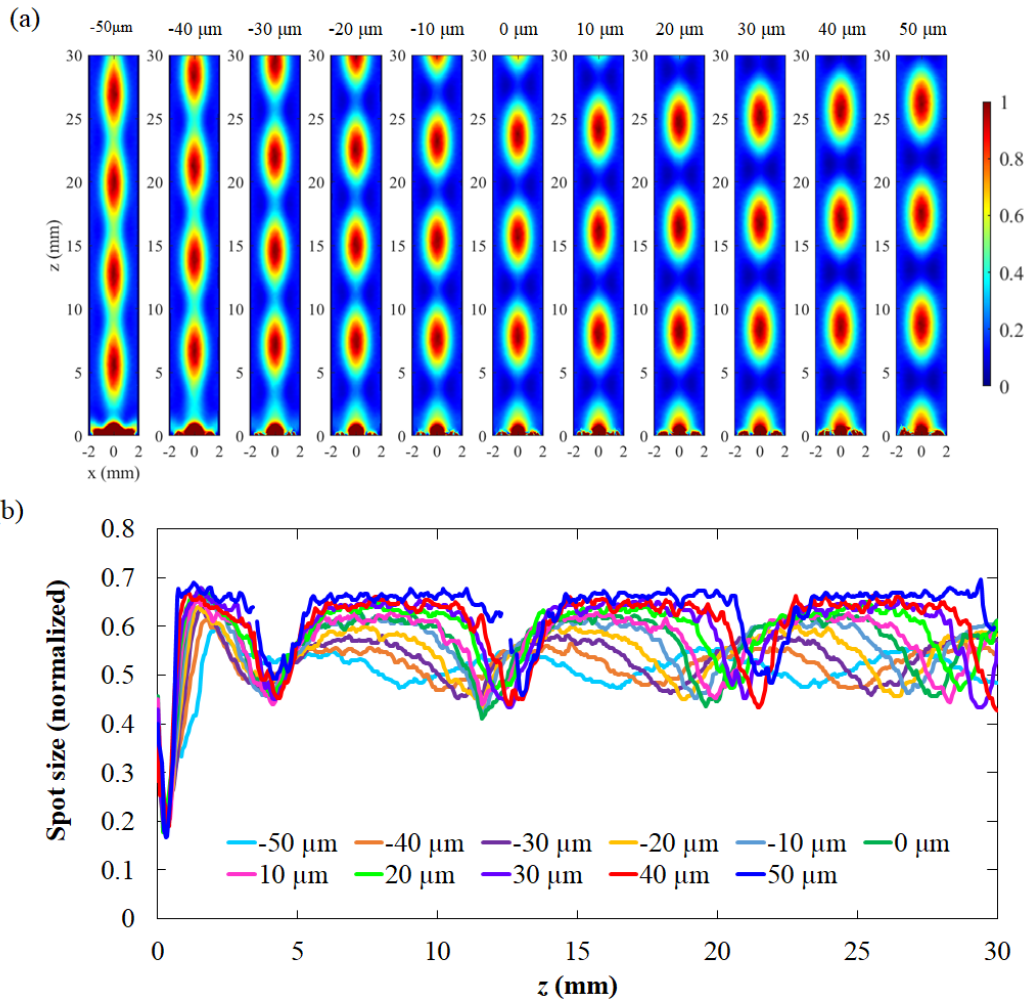


図 5.10 スリット間隔を変化した時の影響、(a)左から基準長さ $1275 \mu\text{m}$ に対して $-50 \mu\text{m} \sim +50 \mu\text{m}$ まで変化した際の強度分布、(b)各条件におけるスポット径の変 (スポット径は波長 3mm で規格化)

変化はタルボ距離で説明できる。タルボ効果とは波面がそろった可干渉光が周期的物体を透過して特定の距離だけ伝播したときに、周期的物体と同じ自己像が形成される効果として知られている[7]。この特定の距離をタルボ距離と呼び、以下のように表すことができる。

$$Z_T = \lambda / (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 / a^2}) \quad (19)$$

a は格子定数 (単位パターン間の距離) であり、スポットの繰り返し距離 Z_T はこの a と波長 λ で表現できる。またこのレンズを透過し生成されたスポットの強度は、単位パターンの面積に対するスリットによる開口率が 31%、単位パターンに照射されるエネルギーのうち、スポットに集まった割合は 7%であった。第 3 章の同心円型と比較すると、レンズ全面の単位パターン毎にスポットを発生させるため、1 つあたりのスポット強度、集光効率は低い。そのため計測には今回の評価で使用したベクトルネットワークアナライザのように高感度な測定器が必要となる。

5.4 設計したメタマテリアル型テラヘルツスーパーオシレーショ

ンレンズの製作と性能の評価

本研究では 0.1 THz 向けにメタマテリアル型 THz-SOL の各寸法をスリットの直径 $D=690$ μm 、スリット間距離 $l=1275$ μm 、単位パターン間の距離 $A=3875$ μm 、スリット幅 $w=127.5$ μm として製作を実施した。直径 101.6 mm、厚み 400 μm のガラス基板の上に金の薄膜を厚み 300 nm 蒸着してパターンを作製した。図 5.11 はガラス基板の上に金とクロムが蒸着されている様子を示した断面模式図である。金の薄膜層で 0.1 THz の電磁波を完全に透過・非透過の領域に分ける必要があるため、厚みは金の染み込み深さ 250 nm に対し余裕を持たせ 300 nm としている。金の薄膜層とガラス基板の間にはバッファ層としてクロム 10 nm を蒸

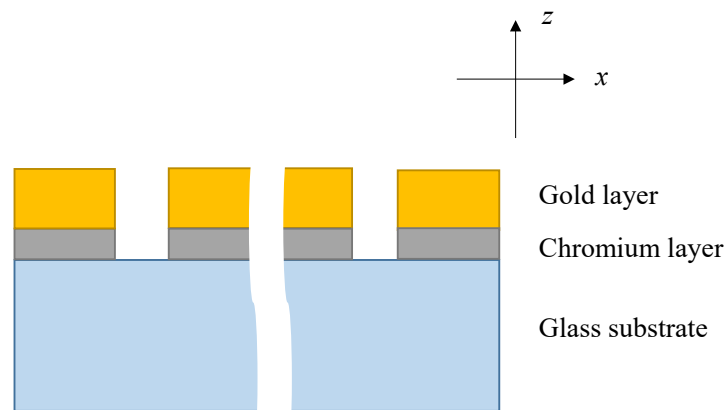


図 5.11 製作したレンズの断層構造模式図

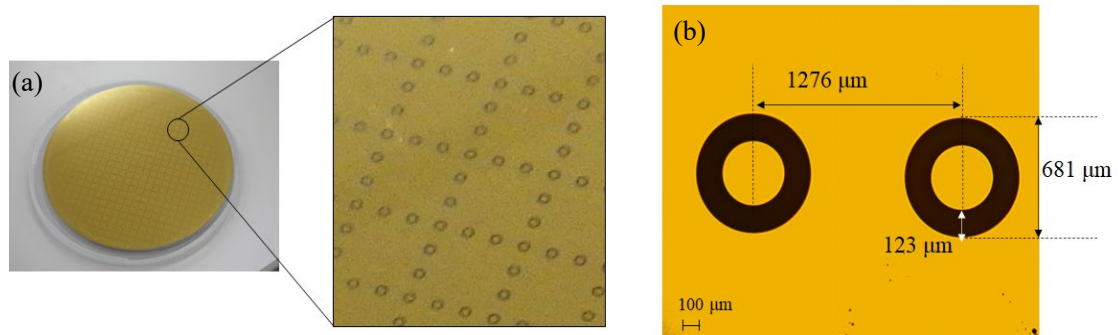


図 5.12 製作したメタマテリアル型の THz-SOL、(a)製作したレンズの写真、(b)電子顕微鏡による観察画像

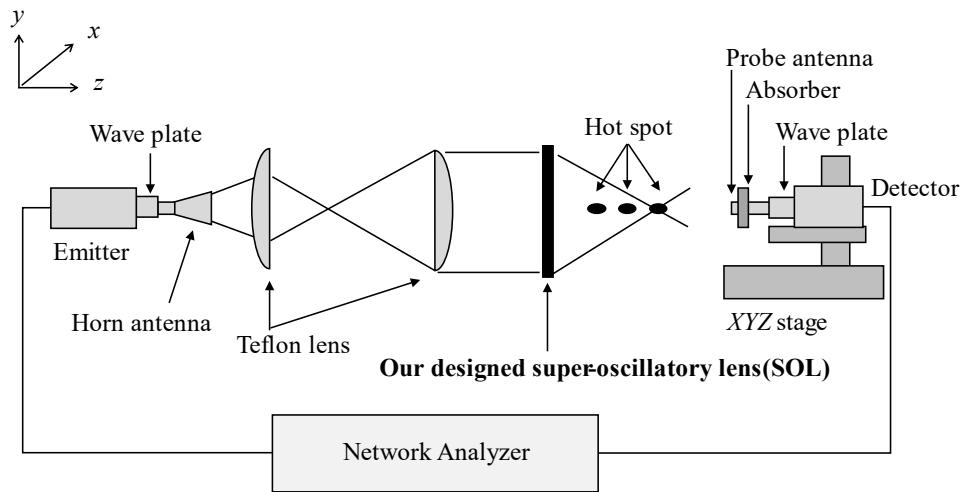


図 5.13 評価系模式図

着している。図 5.12(a)は実際に製作したレンズの写真であり、(b)は電子顕微鏡で円形のスリットを拡大して確認した画像である。作成したレンズパターンの寸法を電子顕微鏡で確認したところ、 $D = 681 \mu\text{m}$ 、 $w = 123 \mu\text{m}$ 、 $l = 1276 \mu\text{m}$ であった。 D が設計値よりも $9 \mu\text{m}$ 小さいが、シミュレーション結果から集光したスポット径への影響は小さいことが予想できるため、こちらのレンズを使って性能評価を実施した。

評価実験系の模式図が図 5.13 である。こちらの評価は第 3 章でも説明した実験系を用いて、 z 方向に繰り返し生成されるスポットの様子を計測した。プローブアンテナ先端に吸収材料を設置しているが、第 3 章の同心円状のレンズの焦点距離 (75 mm) に比べメタマテリアル型の THz-SOL は焦点距離が短い (8 mm 、 16 mm)、プローブアンテナ先端で反射した THz 波がレンズ表面で再度反射し干渉が起こりやすい。図 5.14 はこの干渉の影響について計測結果と計算結果を比較したグラフである。図 5.14(a)は吸収材を設置しないで計

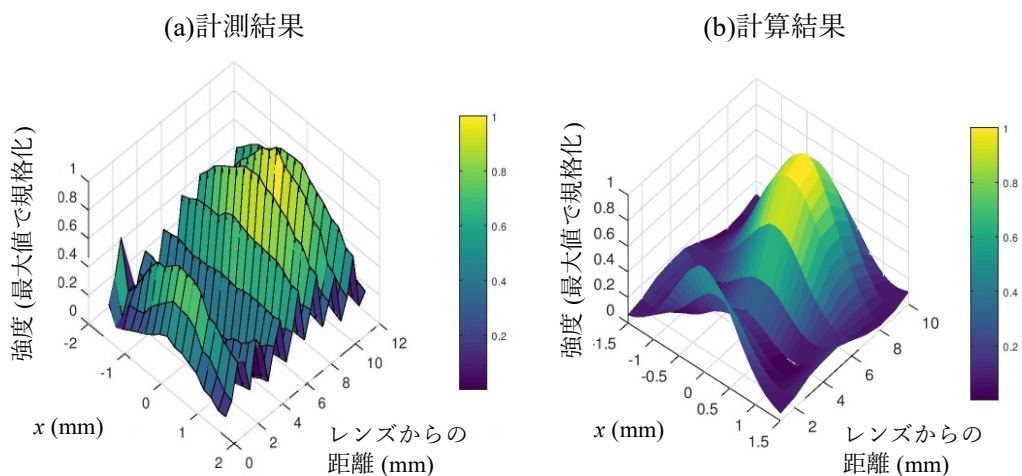


図 5.14 レンズ表面とプローブアンテナ間の干渉の影響、(a)吸収材なしで計測した結果、(b)計算結果

測を行った結果を示しており、レンズから離れる方向 (z 方向) についての強度分布に急峻な変化を確認することができる。これがレンズ表面とプローブアンテナ間の干渉によるものである。図 5. 14(b)は計算結果であり、レンズ表面とプローブアンテナ間の干渉は含まれていないため、滑らかな強度分布の変化をしていることが確認できる。そのため計測を行う際は干渉が含まれないよう吸収材を設置する等の対策が必要となる。

図 5. 15 は図 5. 13 の評価系を使って評価した結果を示したものである。図 5. 15(a)は THz-SOL 通過後の $y=0$ mm における xz 平面内の強度分布を示しており、数値は面内の最大強度で規格化している。このグラフから z 軸方向に繰り返しスポットが生成されていることが確認できる。1つ目のスポット発生位置が $z=8$ mm、その次のスポットの発生位置が $z=16$ mm 付近に確認できる。式(19)からタルボ距離を計算すると本レンズの場合 7.9 mm であり、実験結果とよく一致、設計通りの結果が得られていることがわかる。この繰り返し生成されるスポットのサイズは回折限界よりも小さくなっており、スーパーオシレーションの効果が発現していることを確認できた。図 5. 16 にて詳しく述べる。

図 5. 15(b)は、 $z=8$ mm における $x=0$ mm 上の強度分布を青のプロットで表し、または $y=0$ mm 上における強度分布をオレンジのプロットで示している。この結果から、 xy 平面からスポットを観測した場合、スポットが円形に集光していることがわかる。

図 5. 16(a)は計測結果から z 軸方向のスポット径の変化を示したものである。赤の実線は有限要素法によって計算した結果、青のプロットは計測結果を示している。ここでスポットとして考慮するのは、少なくともスポット中心部の強度の 50%以上が残る領域と定義した。図 5. 16(a)、(b)における灰色の領域は THz 波が集光されていない領域を示している。図 5. 16(b)のグラフにおいて、 $z=7.5$ mm で集光されたスポットサイズは 2.01 mm である。ただし計算結果 (赤の実線) を見ると、ホットスポット間 (灰色の領域) において THz 波の強度が弱く、計測結果からは集光できていないように見える。これは計測に使用した受信側プローブアンテナの開口部直径が 2.1 mm と、有限要素用の計算で用いた空間分解能

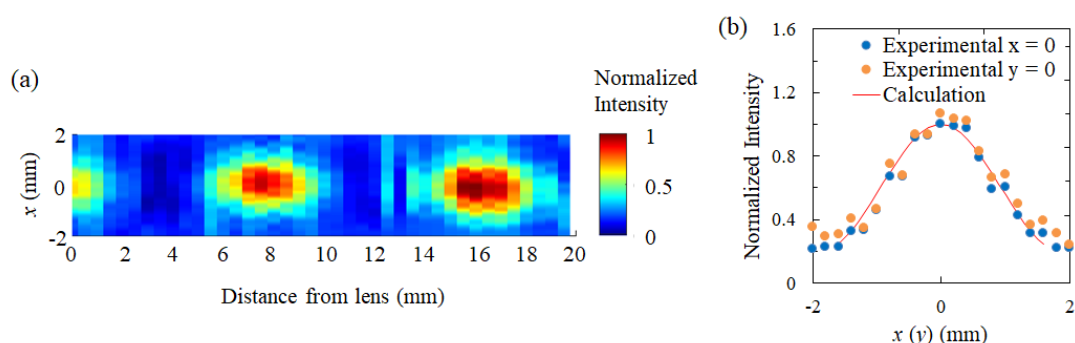


図 5. 15 製作したレンズの評価結果、(a)レンズ通過後の xz 平面における強度分布、(b) xy 平面上の強度分布 (青のプロット： $x=0$ 上の強度分布、オレンジのプロット： $y=0$ 上の強度分布、赤の実線：計算結果)

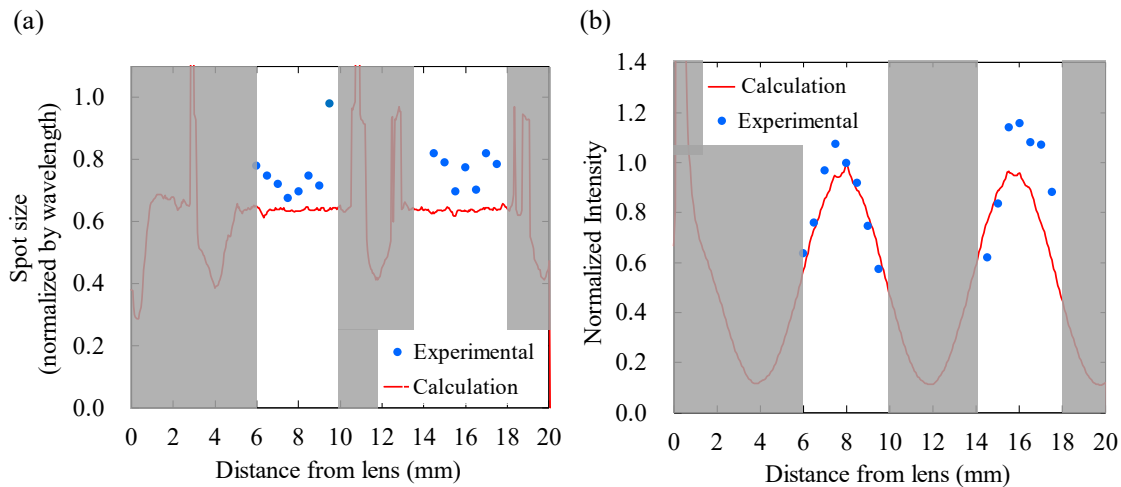


図 5. 16 (a) z 軸方向に対するスポット径（青のプロット：実験結果、赤の実線：計算結果）、(b) z 軸方向に対する $x = 0$ mm 上の強度分布（青のプロット：実験結果、赤の実線：計算結果）

($0.01 \mu\text{m}$) より大きいと予想される。またこの灰色の領域は信号の強度自体も低く十分な S/N 比を確保できていないことも原因と考えている。本 THz-SOL を製品検査等の実アプリケーションで使用する際にはスポットの十分な SN が確保できるスポットの中央部分を使用することになるため、この部分の影響は少ない。図 5. 16(b)は $z = 8$ mm での強度で規格化した $x = 0, y = 0$ 上の z 軸方向に対する強度分布で、赤線が計算結果、青のプロットが実験結果である。シミュレーションでは、第 1 のスポットの強度が第 2 スポットの強度とほぼ同じであるが、実験結果では 2 番目のスポットの方がわずかに強くなっている。これは入射波に対してレンズがわずかに傾いているか、入射波の強度分布による影響だと考えられる。有限要素法の計算は理想的な平面波に対して行っているが、実際に実験で使用したビームの強度分布は正規分布となっているためである。

また、DOF もレンズの性能において重要なパラメータであり、これは図 5. 16(b)から確認できる。計測結果から求めた DOF は第 1 スポットが 2.3 mm、第 2 スポットが 2.2 mm である。これに対し、計算結果では第 1 スポットが 2.1 mm、第 2 スポットが 2.45 mm と両者でよく一致していることがわかる。

また図 5. 16(a)のグラフから、製作した THz-SOL では $z = 8$ mm 付近でスポットサイズが 2.01 mm (0.67λ) であることも確認できる。回折限界が 2.46λ であることから、本提案レンズは従来のレンズによるスポットサイズの約 30%の集光を実現していることが確認できた。計算上、 $z = 8$ mm におけるスポット径は 0.65λ であり、計測結果とよく一致している。

このように、0.1 THz 用に作製した THz-SOL では、従来のレンズと同等の DOF を維持しながら、回折限界を超えて集光できるレンズであることを実験により確認することができた。

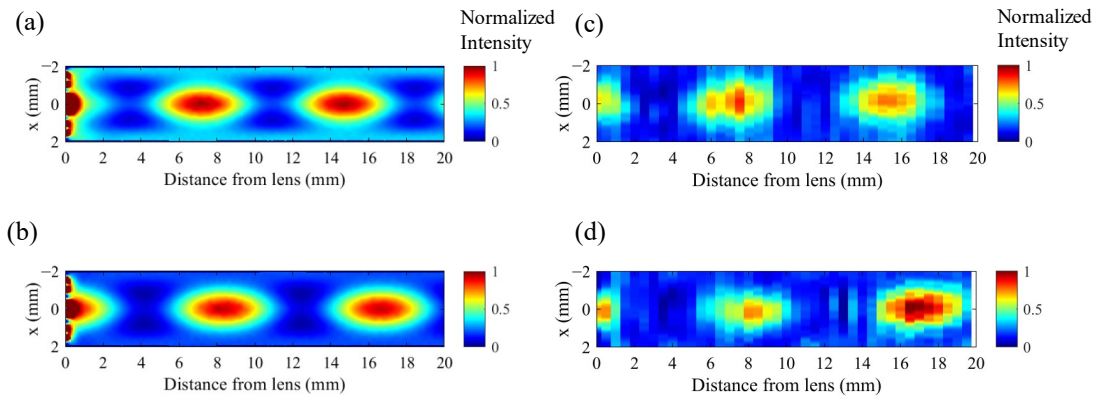


図 5.17 入力周波数による集光への影響、(a)計算結果 (0.097 THz)、(b)計算結果 (0.103 THz)、(c)実験結果 (0.097 THz)、(d)実験結果 (0.103THz)

次に本レンズの周波数依存性について述べる。このレンズの特性上、焦点サイズと焦点距離は入射ビームの周波数に影響を受ける。本レンズは 0.1 THz を対象として設計されているが、一般的な THz 波帯の発振器（共鳴トンネルダイオードやショットキーバリアダイオード）は単一の周波数ではなく、ある程度広がりを持った周波数の THz 波を放射している[8,9]。ここでは 0.1 THz 用に設計したレンズに対し設計周波数と異なる周波数の THz 波を入射した場合の集光能力への影響を評価した。図 5.17(a)は 0.097 THz、(b)は 0.103 THz のビームがレンズを通過した後の強度分布を有限要素法にて計算したものである。スポット間距離は図 5.17(a)では 7.5 mm、(b)では 8.35 mm である。これらに対して図 5.17(c)は 0.097 THz のビーム、(d)は 0.103 THz のビームがレンズを通過した後の強度分布を実験で確認したものである。図 5.17(a)と(c)、(b)と(d)を比較するとスポットの発生位置はよく一致して

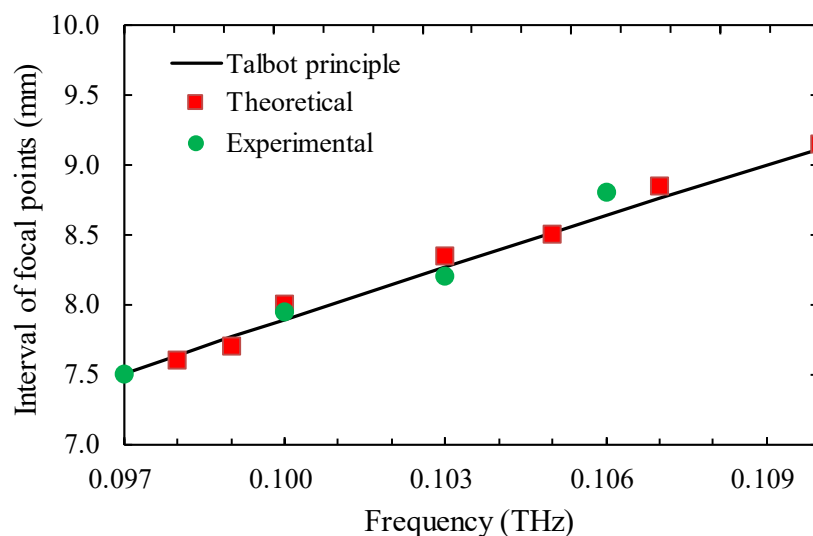


図 5.18 メタマテリアル型 THz-SOL のスポット発生間隔と入射する周波数の関係

いることがわかる。図 5. 18 はスポット間距離の周波数依存性を比較したグラフになっている。黒の実線が式(19)のタルボ距離の式をもとに算出した計算結果、赤い四角が有限要素法で計算した結果、緑の丸は実験結果を示している。これら 3 つの結果から実験結果と計算結果でよく一致していることが確認できる。この特性を使えば THz-SOL ではあえて入射する周波数を変えることで焦点位置の調整に利用することもできる。

5.5 まとめ

本章では複数カ所を同時に高分解能で計測するための THz-SOL 開発について述べた。レンズと垂直な方向に繰り返しホットスポットを生成するメタマテリアルベースの THz-SOL を 0.1 THz 向けに設計・作製し、その性能を実験的に実証することに成功した。直径 101.6 mm、焦点距離 7.5 mm のこのレンズは、THz 波を直径 0.67λ の小さなスポットに集光し、従来のレンズの回折限界 2.46λ よりも小さな領域に集光できることを実験・計算の両面から示した。本提案レンズで使用したのは直径 127.5 μm の円形スリットを 5 つ組み合わせた $3875 \times 3875 \mu\text{m}$ の単位パターンである。本提案 THz-SOL は、従来のレンズよりも大幅に高い解像度と 2λ 以上 (Far-field) の焦点距離を実現するだけでなく、複数のスポットに同時に THz 波を集光できる。さらに本提案 SOL は入射する周波数の THz 波を変えて焦点距離を変えることができ、提案レンズの設計を変更することなく焦点距離を容易に調整することもできる。この提案レンズは、回折限界以下の集光サイズ、10 mm 以上の長く調整可能な焦点距離が実現できている。ただし DOF については 2.3 mm と目標の 5 mm を達成できていないこと、スポットの集光効率は同心円型と比較すると低いことから、実用化の際には S/N 比を確保する工夫が必要となることも明確にした。しかし、レンズ面内に生成される複数のスポット毎に受信機を設置すれば同時に多点計測することも可能というユニークな特徴もあり、用途に合わせて使い分けていくことが重要である。

参考文献

- [1] F. M. Huang *et al.*, Appl. Phys. Lett., **90**, 91119, 1-3 (2006).
- [2] T. Roy *et al.*, Opt. Express, **21**, 6, 7577 (2013).
- [3] A. Nagarajan *et al.*, Opt. Express, **27**, 20012-20027 (2019).
- [4] D. Liao *et al.*, Photon. Res. **10**, 8, 1924-1930 (2022).
- [5] A. Maleki *et al.*, Photon. Res., **11**, 4, 526-532 (2023).
- [6] E. Plum *et al.*, J. Opt. **13**, 5, 055102 (2011).
- [7] H. F. Talbot Philos. Mag. Lett., **9**, 56, 401-407 (1836).

- [8] D. Horikawa *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.* **33**, 114005 (2018).
- [9] T. Suzuki *et al.*, in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 9, 1649-1655 (1999).

第6章 総括

本研究においては、THz波計測における課題であった分解能向上のための回折限界以下の集光を実現する手段について研究に取り組んだ。THz波計測をより普及させ、実用的にしていくためには回折限界以下の集光だけではなく、長い焦点距離、DOFも重要であり、こちらも条件として満たすような集光コンポーネント開発に取り組んできた。THz波用集光コンポーネントとして、回折限界以下の分解能、10 mm以上のFar-fieldの焦点距離、5 mm以上の長いDOFの3つの目標を満たすことができる技術として、本研究では顕微鏡用途で可視光やUV向けに研究されていたSOLに着目し、THz波帯での応用に取り組み、様々な用途を想定して形状が異なる3種類のレンズを開発し、全てにおいてTHz波帯で回折限界以下の集光ができることを計算・実験の両面から実証を行った。以下に本研究で得られた主要成果を記述し、今後の展望について言及を行い総括とする。

- (1) 同心円型の金属パターンを用いてSOLをTHz波帯向けに製作、評価を実施し、THz波帯でも他周波数帯と同様にスーパーオシレーション効果を発現し、回折限界以下の集光が実現できることを確認した。また焦点距離、DOFについても目標を達成していることが確認できた。加えて、このレンズ使用時の計測分解能を評価するため、金属パターンに幅の異なるスリットを設けた評価用サンプルを使って計測したところ 1.5 mm (0.5λ)の性能があることを確認できた。本レンズに入射したエネルギーのうちスポットに集まるのは15.7%。
- (2) THz-SOLの実用性を広げるため、1軸方向に集光するレンズパターンを設計製作し、評価を実施した。ラインアンドスペースの金属パターンを用いて、パターンの長手方向と直行する方向に偏光を持つTHz波を入射することで、パターンの短手方向に対して集光できる計算結果が得られており、その幅も回折限界以下であること計算結果を得た。入射したエネルギーのうちスポットに集まるのは25.5%。またこのとき実効的なNAを算出すると1.43と従来レンズ以上であり、DOFは 3.3λ と従来レンズを超える性能が確認できている。実際に $f=50, 100\text{ mm}$ のTHz-CSOLを製作し、実験の結果から回折限界を超える集光能力があることを確認できた。
- (3) スーパーオシレーションは様々なパターンを用いて発現することができ、ここではメタマテリアルの技術を使い波長以下のパターンを周期的に並べることで、レンズ面内に複数の極小のスポットを生成することができるレンズを開発した。この特徴を生かせばレンズ面内において複数点を同時に計測することも可能である。また、同心円型と異なり、スポットが焦点距離方向に繰り返し発生するというユニークな特徴もあり、この繰り返し発生する間隔をタルボ効果で説明できることを実験、計算の両面から確認した。この繰り返しスポットが発生する特性を生かせばレンズを再設計しなくても他生の焦点距離の調整も可能である。本研究では回折限界の0.27倍のスポットサイズ、16 mmの焦点距離、を達成できることを確認したが、DOF = 2.1 mmと目標の5 mmを少し下回っている。本レンズに入射したエネルギーのうちスポットに集まるのは7.0%。

実際にメタマテリアル型の THz-SOL を使った計測をするときには、この点注意し計測対象の動きを抑制する・停止させるといった工夫が必要になることも明らかになった。

以上のように特徴の異なる 3 つの THz-SOL について設計製作・評価を行ってきた。今回作製した(1)と(2)のレンズを比較すると、(1)のほうが焦点サイズは小さく集光効率が高い。SOL はスリットの長手方向と直行する方向の偏光成分のみが透過し、偏光と同じ方向に集光する性質を持っている。同心円型の場合は円偏光を入射しており、スリットの長手方向とちょうど直交する方向からわずかにずれた成分もパターンに入射され透過し、散乱する。これらを含めてレンズ透過後の強度分布を計算し、レンズパターンを最適化するため単純なラインアンドスペース型のデザインである(2)よりも設計の幅が広く集光効率の高い設計ができるのだと考えている。しかし、(1)は微小な 1 点に集光するため 1 度で計測可能な範囲が狭く、面で計測したい場合には被計測物を移動させる等の工夫が必要になる。その点、(2)は 1 軸方向に対しては一度に集光・照射できるため THz ライン・エリアカメラを用意すれば一度に 1 軸方向にスキャンすることが可能である。また被計測物を集光と同じ方向に移動させれば被計測物全体をスキャンすることができる。実用化において、用途・条件に合わせて(1)、(2)を使い分けることが重要となってくる。一方、(3)のメタマテリアル型は(1)、(2)と比較すると、レンズ面内に複数のスポットを生成し、かつ焦点距離方向に繰り返しスポットが生成されるという少し特殊な特徴を持っている。例えば、被計測物上の定められた複数の点を継続してモニタリングしたい場合などは(3)のレンズが活用できる。しかし、入射したエネルギーが生成された複数のスポットに分散してしまうため、(1)、(2)のレンズと比較すると 1 つ当たりのスポット強度は弱い。そのため被計測物からの透過強度または散乱強度のシグナルが小さくなってしまう。この点も(3)のレンズ活用時には考慮しなければいけない。このように各レンズとも異なる特徴を持っており、よく理解したうえで用途に合わせて活用することが THz-SOL を実用化するために重要な点である。

最後に、これまであまり注目されてこなかった THz 帯のスーパーオシレーションという手法に着目してきたが、回折限界以下のスポット、10 mm 以上の焦点距離、5 mm 以上の DOF を満たすことのできる THz 波帯の強力な集光コンポーネントとしてのポテンシャルが確認できた。一方で透過率については金属のマスクでロスする部分が生じるため高い S/N 比を求められる計測対象に対しては改善が必要だと考えている。SOL の透過性能は金属パターンの開口率で決まり、提案レンズは集光効率が 20%程度と従来レンズに比べると効率が低い。この点については SOL のパターンを不透過・透過の 2 値ではなく複数の透過率の領域を作り最適化することで改善できると考えている。またこれまでは最適化をレンズ通過後の強度を用いて行ってきたが、位相に着目してデザインを最適化することでより透過率を改善できると考えている。これらに取り組むことでさらに THz-SOL の適用範囲が広がり、THz 波計測の普及を加速できると考えている。

研究業績

原著論文

1. A. Iba, C. W. Domier, M. Ikeda, A. Mase, M. Nakajima, A. V. Pham, and N. C. Luhmann, **“Subdiffraction focusing with a long focal length using a terahertz-wave super-oscillatory lens”**, Opt. Lett., **46**, 19, 4912-4915 (2021).
2. A. Iba, M. Ikeda, V. C. Agulto, V. K. Mag-Usara, and M. Nakajima, **“A Study of Terahertz-Wave Cylindrical Super-Oscillatory Lens for Industrial Applications”**, Sensors, **21**, 20, 6732 (2021).
3. A. Iba, M. Ikeda, V. C. Agulto, V. K. Mag-Usara, and M. Nakajima, **“Sub-diffraction Focusing using Metamaterial-based Terahertz Super-oscillatory Lens”**, Appl. Sci., **12**, 24, 12770 (2022).

国際会議、シンポジウム発表 (口頭発表)

- [1] A. Iba, M. Ikeda, M. Nakajima, **“Study of Sub-diffraction focusing using terahertz superoscillatory lens”**, JSAP-OSA Joint Symposia, Nagoya, Japan, August 26, 12p_N405_6 (2021).
- [2] A. Iba, M. Ikeda, V.C. Agulto, V. K. Mag-Usara, and M. Nakajima, **“Sub-diffraction focusing with THz super-oscillatory lens”**, The Third International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2022), Fukui, Japan, November 16-18, Fr2-2 (2022).

謝辞

本研究を進め、また本論文をまとめるにあたり常に適切な御助言ならびに丁寧な御指導をしてくださいました大阪大学 レーザー科学研究所 中嶋誠准教授に心より感謝します。

また本論文をまとめるにあたって、懇切丁寧なご指導・ご教授を賜りました大阪大学レーザー科学研究所 吉村政志教授、大阪大学大学院工学研究科 蔵満康浩教授に深くお礼申し上げます。

また在学中ご指導いただいた大阪大学大学院工学研究科電気電子情報通信工学専攻の先生方、上田良夫教授、兒玉了祐教授、舟木剛教授、高井重昌教授、牛尾知雄教授、村上匡且教授、巽啓司准教授、羽原英明准教授、尾崎典雅准教授、加藤裕史准教授、中田芳樹准教授、長友英夫准教授、沈迅助教、福永崇平助教、和田有希助教、安部勇輝助教、伊庭野健造助教、中村浩隆助教、橋本和宗講師、井淵貴章講師、Lee Heun Tae 講師にも深く感謝いたします。

本研究の論文投稿に関して丁寧にご指導いただいた Verdad C. Agulto さん、Valynn Katrine Mag-usara さんに深く感謝いたします。

本研究の実験を行うにあたり親身にご協力いただいたカリフォルニア大学デービス校 Davis Millimeter Research Center の Luhmann 教授、Pahm 教授、Calvin W. Domier さんに深く感謝いたします。

また本研究を行う機会を作っていただいた旭化成株式会社 生産技術本部 田川克志前本部長、岡田慎一本部長、生産技術センター 北田 敏夫 前センター長、センシング技術部 内山隆平前部長、池田誠人課長に深く感謝いたします。

このほか、多くの方にご指導ご協力を賜りました。深く感謝の意を表します。

最後にこの研究の遂行ならびに論文の執筆にあたり、常に応援し支えてくれた妻の葉子、娘の楓に感謝いたします。

2024年2月
射庭 彩人